



Aalto-yliopisto
Insinööritieteiden
korkeakoulu

Sami Lönnroth

Muovikomposiittiputken soveltuminen tierummuiksi ja silloiksi Suomen oloihin

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 22.09.2014

Valvoja: Professori Leena Korkiala-Tanttu

Ohjaaja: DI Jani Meriläinen

Tekijä Sami Lönnroth

Työn nimi Muovikomposiittiputken soveltuminen tierummuiksi ja silloiksi Suomen oloihin

Laitos Rakennustekniikan laitos

Professuuri Pohjarakennus ja maamekaniikka

Professuurikoodi Rak-50

Työn valvoja Professori Leena Korkiala-Tanttu

Työn ohjaaja(t)/Työntarkastaja(t) DI Jani Meriläinen, Liikennevirasto

Päivämäärä 22.09.2014

Sivumäärä 101+9

Kieli Suomi

Tiivistelmä

Maahan asennettujen putkien kantavuus perustuu maan ja putken yhteistoimintaan. Yhteistoiminnan mahdollistaa putken ja maan välinen kitka putken ulkopinnalla. Tässä diplomityössä tutkittiin muovikomposiittiputkia ja niiden toimintaa tierumpuina. Muovikomposiitissa yhdistyy muoviaiineen kemiallinen kestävyys sekä lujitteiden lujuus- ja jäykkyyssominaisuudet. Muovikomposiittien kemiallinen kestävyys luo kilpailuedun korrosioherkkiin teräsputkiin verrattuna.

Diplomityön tavoitteena oli tutkia muovikomposiittiputkien soveltuvuutta kantaviksi putkirakenteiksi tiepenkereihin. Muovikomposiitin kelpoisuutta tutkittiin kirjallisuustutkimuksena sekä kokeellisilla kuormituksilla ja elementtilaskentaohjelmalla. Kirjallisuustutkimuksessa tarkasteltiin muovikomposiitin vanhenemista. Kokeellisilla kuormituksilla sekä elementtilaskentaohjelmalla tutkittiin muovikomposiittiputken kantokestävyyttä. Muovikomposiittiputken kantokestävyyden tutkimisessa keskityttiin muodonmuutosten ja niiden kautta laskettujen jännitysten tarkasteluun. Putken pysyviä muodonmuutoksia mitattiin laserkeilaimella ja hetkellisiä muodonmuutoksia mitattiin venymäliuskoilla sekä siirtymäantureilla. Hetkellisissä muodonmuutosmittauksissa käytettiin putken kuormittamiseen kolmi- ja neliakselisia kuorma-autoja.

Kirjallisuustutkimuksessa selvisi, että muovikomposiitit kestävät hyvin fysikaalisia ja kemiallisia rasituksia lukuun ottamatta happoliuoksia. Pysyvien muodonmuutoksien mittaukset osoittivat, että laserkeilain antoi virheellisiä arvoja putken sisähalkaisijoista. Kokeellisten kuormitusten ja laskentojen perusteella kuorma-autojen aiheuttamat muodonmuutokset ja jännitykset eivät ole kriittisiä putken kantokestävyyden suhteen.

Avainsanat muovikomposiitti, putki, muodonmuutos, vanheneminen, silta, laserkeilain

Author Sami Lönnroth		
Title of thesis Suitability of plastic composite pipe for use in culverts and road bridges in Finland		
Department Civil and Structural Engineering		
Professorship Soil Mechanics and Foundation Engineering		Code of professorship Rak-50
Thesis supervisor Professor Leena Korkiala-Tanttu		
Thesis advisor(s) / Thesis examiner(s) M.Sc. Jani Meriläinen		
Date 22.09.2014	Number of pages 101+9	Language Finnish

Abstract

The load-carrying capacity of buried pipes is based on the pipe-soil interaction, which is enabled by the friction between the pipe and the soil. In this master's thesis plastic composite pipes and their activities as culverts were investigated. A plastic composite combines the chemical resistance of the plastic and the stiffness and strength properties of its fiber reinforcements. The chemical resistance of plastic composite creates a competitive advantage over steel, which is prone to corrosion.

The objective of this master's thesis was to study the suitability of plastic composite pipe for load-bearing structures in road embankments. Qualification of a plastic composite pipe was investigated via a literature study, full scale tests and a FEM-program. In the literature study the weathering of the plastic composite was examined. The load-bearing capacity of the plastic composite pipe was examined mainly through deformation and stress analysis. The permanent deformations of the pipe were measured with a laser scanner, while the temporary deformations were measured with strain gauges and displacement transducers. Three- and four-axis lorries were used for pipe loading in the temporary deformation measurements.

The literature study showed that plastic composites are highly resistant to physical and chemical stresses, except for acid solutions. The permanent deformation measurements showed that the laser scanner gave inaccurate values for the inside diameter of the pipe. According to full scale tests and calculations, the deformations and stresses caused by lorries do not have a critical effect on the load bearing capacity of the pipe.

Keywords plastic composite, pipe, deformation, weathering, bridge, laser scanner

Alkusanat

Tämä diplomityö on tehty Aalto-yliopiston insinööritieteiden korkeakoulun georakentamisen tutkimusryhmässä. Työn tilasi ja rahoitti Liikennevirasto, jota kiitän tämän diplomityön mahdollistamisesta.

Työtä valvoi professori Leena Korkiala-Tanttu, jota kiitän työn tarkastamisesta sekä kaikista kommenteista ja neuvoista. Kiitokseni haluan myös esittää työtä ohjanneelle ja kommentoineelle ohjausryhmälle, johon kuuluivat työn ohjaajan Jani Meriläisen lisäksi Timo Tirkkonen, Minna Torkkeli, Panu Tolla, Aki Litokorpi, ja Olli-Pekka Aalto. Edellä mainittujen lisäksi haluan kiittää Jarmo Vihervuorta ja Veli-Antti Hakalaa koekuorimitukseen osallistumisesta sekä siihen liittyvistä arvokkaista neuvoista. Kiitokset myös Matti Ristimäelle ja Matti Lojanderille laboratoriokokeiden ohjauksesta sekä muille diplomityön tekijöille ja georakentamisen tutkimusryhmälle kannustavasta työilmapiiristä.

Lopuksi haluan kiittää perhettä sekä kaikki kavereita tuesta ja kannustuksesta opintojeni aikana.

Espoo 22.9.2014

Sami Lönnroth

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	
Abstract	
Alkusanat	
Sisällysluettelo	5
Merkinnät	7
Lyhenteet	9
1 Johdanto	10
2 Muovikomposiittiputket	12
2.1 Materiaali ja valmistustavat	12
2.2 Materiaaliominaisuudet	14
2.3 Putkien asennus ja liitostekniikka	15
2.4 Sovelluskohteet	19
3 Muovikomposiitin vanhenemiseen vaikuttavat tekijät	21
3.1 Kemikaalien vaikutus	21
3.2 Mekaaninen rasitus	22
3.3 Jännityssäröily ja jännityssäröilykorroosio	24
3.4 Ultravioletti säteilyn ja lämpötilan vaikutus	25
3.5 Mikro-organismien vaikutus	26
4 Putkirakenteen laskentamenetelmät	28
4.1 Analyttiset menetelmät	28
4.1.1 Pystysuora maanpaine	28
4.1.2 Maanpaineen jakautuminen	32
4.1.3 Maanpaineeseen ja sen jakautumiseen vaikuttavat tekijät	34
4.2 Numeerinen menetelmä	36
4.2.1 Yleistä	36
4.2.2 Malli ja elementit	37
4.2.3 Materiaalimallit	38
5 Åkerfeltin koekohde	41
5.1 Instrumentointikohde	41
5.2 Putken pysyvien muodonmuutosten mittaus	43
5.2.1 Mittauslaitteet	43
5.2.2 Mittausjärjestelyt ja mittauksen suoritus	44
5.2.3 Mittaustulokset	45
5.2.4 Laserkeilauksen virhelähteitä	51
5.3 Hetkellisten muodonmuutosten mittaus	51
5.3.1 Mittauslaitteet	51
5.3.2 Mittausjärjestelyt	53
5.3.3 Mittauksen suoritus	54
5.3.4 Mittaustulokset	55
6 Laboratoriokokeet	65
6.1 Maanpohjan luokituskokeet	65
6.2 Lujuusominaisuudet	65
6.2.1 Rasialeikkauskokeen koejärjestelyt	65
6.2.2 Kokeen suoritus	68
6.2.3 Koetulokset ja niiden tulkinta	69
6.3 Maan ja putken välinen kitkakoe	71
6.3.1 Koejärjestelyt	71

6.3.2	Kokeen suoritus.....	72
6.3.3	Koetulokset	72
7	Koekohteen laskennallinen analyysi	77
7.1	Laskentamalli ja lähtötiedot	77
7.2	Mallinnuksen kulku	82
7.3	Tulokset	83
7.4	Herkkyysanalyysi ja niiden tulokset.....	87
8	Tulosten vertailu ja analysointi	90
8.1	Tulosten luotettavuus	90
8.2	Laskennallisten arvojen ja mittaustulosten vertailu ja analysointi	90
9	Johtopäätökset	93
	Lähdeluettelo	95
	Liiteluettelo	101
	Liitteet	

Merkinnät

A	[m ²]	pinta-ala
B	[m]	kaivannon leveys
B _s	[MPa]	väsymislujuuden verrannollisuuskerroin
B _v	[m]	kaivannon vähimmäisleveys
D	[m]	putken ulkohalkaisija
D _N	[m]	putken nimellishalkaisija
E	[MPa]	kimmomoduuli
E'	(MPa)	maan passiivivastusmoduuli
E _m	[MPa]	maamateriaalin kimmomoduuli putken ympärillä
E _{oed}	[MPa]	ödometrikokeen avulla määritetty tangentialmoduuli
E _{oed}	[MPa]	referenssi tangentialmoduuli
E _p	[MPa]	putkimateriaalin puristuskimmomoduuli
E _{pu}	[Mpa]	putkimateriaali kimmomoduuli
E _s	[Mpa]	ödometrikokeen avulla määritetty sekanttimoduuli
E _t	[MPa]	putkimateriaalin taivutuskimmomoduuli
E _{ur}	[MPa]	kuormituksen palautumis-/toistovaiheen moduuli
E _{ur}	[MPa]	referenssi palautumis- /toistovaiheen moduuli
E ₁	[MPa]	ensimmäinen kantavuusmittauksen tulos
E ₂	[MPa]	toistokuormitusten tulos
E ₅₀	[MPa]	avoimen kolmiaksaalikokeen avulla määritetty sekanttimoduuli
E ₅₀ ^{ref}	[MPa]	referenssi sekanttimoduuli
H	[m]	peitesyvyys
H _e	[m]	yhtä suuren painuman tason etäisyys putken harjalta
I	[m ⁴]	putken seinämän jähyysmomentti
K _a	[-]	aktiivinen maanpaine kerroin
M	[kNm/m]	poikkileikkaukseen kohdistuva taivutusmomentti
N	[kN/m]	poikkileikkaukseen kohdistuva normaalivoima
P _{QZ}	[MN/m]	putkeen kohdistuva pystykuorma pyöräkuormasta
P _v	(MN/m)	putkeen kohdistuva pystysuora kuorma
P _{vjk}	[MN/m]	jäykkään putkeen kohdistuva täytemaakuorma kaivannossa
P _{vjp}	[MN/m]	jäykkään putkeen kohdistuva täytemaakuorma penkereessä
P _{vtk}	[MN/m]	joustavaan putkeen kohdistuva täytemaakuorma kaivannossa
P _{vtp}	[MN/m]	joustavaan putkeen kohdistuva täytemaakuorma penkereessä
Q	[kN]	pistekuorma
T	[°C]	materiaalin lämpötila
V	[km/h]	ajoneuvon nopeus
W	[kN/m/m]	levyn paino
c	[kPa]	koheesio
d	[mm]	paksuus
d _m	[m]	putken keskihalkaisija
m	[-]	jännitysekspONENTTI
p ^{ref}	[mm]	referenssi jännitys
r	[mm]	putken keskilinjan säde
r _p	[m]	putken säde

r_{sp}	[-]	painumasuhde
s	[m]	putken seinämäpaksuus
s_f	[mm]	maapohjan painuma putken alla
s_g	[mm]	maapohjan painuma putken vieressä
s_m	[mm]	täytemaan painuma putken vieressä
u_y	[kPa]	pystysuuntainen siirtymä
u_x	[mm]	vaakasuuntainen siirtymä
w	[%]	vesipitoisuus
Δx	[mm]	vaakasiirtymä
Δy	[mm]	pystysiirtymä
$\Delta \sigma$	[MPa]	maanpaineen lisäys
α	[-]	projektiosuhde
α_0	[°]	putken harjaan kohdistuva kuorman jakautumiskulma
β	[°]	maanpaineen leviämiskulma
β_k	[°]	kaivannon luiskakaltevuus
γ	[kN/m ³]	tilavuuspaino
γ_t	[kN/m ³]	täytemaan tilavuuspaino
θ_a	[-]	ajasta ja putkimaterialista riippuva kerroin
θ_b	[-]	tukireaktion jakautumiskulmasta riippuva kerroin
θ_1	[°]	ensimmäisen pääjännityksen suuntakulma
θ_2	[°]	toisen pääjännityksen suuntakulma
μ	[-]	kitkakerroin
ν	[-]	poisson luku
ρ	[kg/m ³]	alkuperäinen irtotiheys
ρ_d	[kg/m ³]	kuivairtoteheys
ρ_s	[kg/m ³]	kiintoteheys
σ	[kPa]	murtopinnalla vaikuttava kokonaisnormaalijännitys
σ_{ah}	[MPa]	aktiivisen maanpaineen suuruus putken pohjan korkeudella
σ_H	[MPa]	putken sivuille kohdistuva vaakasuora maanpaine
σ_L	(MPa)	lämpöjännitys
σ_{QZ}	[MPa]	pyöräkuorman aiheuttama pystysuora maanpaine
σ_s	[MPa]	muovikomposiitin väsymisluku
σ_v	[MPa]	putken harjan korkeudella vaikuttava pystysuora maanpaine
σ_{vk}	[MPa]	putkeen kohdistuva pystysuora maanpaine kaivannossa
σ_{vm}	[MPa]	muovikomposiitin staattinen vetomurtolujuus
σ_{vp}	[MPa]	putkeen kohdistuva pystysuora maanpaine penkereessä
σ_1	[N/mm ²]	ensimmäinen pääjännitys
σ_2	[N/mm ²]	toinen pääjännitys
σ_3'	[kPa]	tehokas vaakajännitys
τ	[kPa]	murtopinnalla vaikuttava leikkausjännitys
τ_{max}	[kPa]	maksimi murtopinnalla vaikuttava leikkausjännitys
φ	[°]	maan sisäinen kitkakulma
φ_0	[°]	pohjapaineen jakautumiskulma putkeen nähden
φ_{lt}	[°]	luiskan ja täytemaan välinen kitkakulma
φ_t	[°]	täytemaan kitkakulma
ψ	[°]	dilataatiokulma

Lyhenteet

AB	Asfalttibetoni
ABK	Kantavan kerroksen asfalttibetoni
CC	Centrifugal Casting
GRP	Glass fiber Reinforced Plastics
HS	Hardening soil materiaalmalli Plaxis
HSsmall	Hardening soil model with small-strain stiffness materiaalmalli Plaxis
LE	Lineaarisesti elastinen materiaalmalli Plaxis
MC	Mohr-Coulombin materiaalmalli Plaxis
RIL	Suomen Rakennusinsinöörien Liitto
SFS	Suomen Standardisoimisliitto

1 Johdanto

Tutkimuksen tausta

Suomessa on 3202 rekisteröityä putkisiltaa Liikenneviraston ajoneuvo- ja kevyen liikenteen väylillä (Meriläinen 2014) ja lukematon määrä rekisteröimättömiä rumpuputkia. Putki määritetään sillaksi kun sen sisähalkaisija on yli kaksi metriä. Putkisillalla tarkoitetaan maahan asennettua kevyttä liikennettä, maataloutta tai vesistöä palvelevaa kulkureittiä. (Tiehallinto 2009a, s. 12.) Tavallisimmin putkisillat ja rumpuputket valmistetaan aallotetusta teräsohutlevystä (Liikennevirasto 2014, s. 12). Maahan asennetun aallotetun teräsohutlevyputken kantavuus perustuu maan ja putken yhteistoimintaan, jossa maan kantaa suurimmaksi osaksi maan ja putken muodostamaan rakenteeseen kohdistuvat kuormat. Teräspanputken jäykkyyden kasvu lisää putkeen kohdistuvaa kuormaa, jolloin maan kantama osuus samalla pienenee. Putken ja maan välisen yhteistoiminnan mahdollistaa putken ja maan välinen kitka putken ulkopinnalla. (RIL 1990, s. 155, 186-188.)

Siltoihin kohdistuu liikenteestä ja ympäristöolosuhteista johtuvia mekaanisia, fysikaalisia ja kemiallisia rasituksia, jotka heikentävät jatkuvasti siltojen kestävyyttä niiden käytössä aikana (Tiehallinto 2009b, s. 11). Teräs on korroosio herkkä materiaali, joten korroosion takia teräspanputket joudutaan suunnittelemaan seinämävahvuudeltaan suuremmaksi kuin mitä kantokestävyys vaatisi. Lisäksi teräspanputket joudutaan kuumasinkittämään vaadittavan käyttöiän saavuttamiseksi. Yleensä teräspanputki suojataan lisäksi pinnoitteella kuten epoksimaalilla. (Liikennevirasto 2014, s. 17-19, 48-53.) Maanteiden teräspanputkisiltojen normaali suunnittelukäyttöikä on 50 vuotta (Liikennevirasto 2014, s. 11). Seuraavan 10 vuoden aikana putkisilloista on korjattava tai uusittava noin 150 siltaa (Meriläinen 2014).

Tässä diplomityössä tutkitaan muovikomposiittia vaihtoehtoisena putkimateriaalina teräkselle. Muovikomposiitissa muoviaiine toimii side- että suoja-aineena lujittaville kuiduille, jotka antavat komposiitille lujuuden ja jäykkyyden. Lujittavat kuidut voivat olla jatkuvia tai katkottuja. (Saarela ym. 2003, s. 17.) Komposiiteissa käytetyimmät lujittekuuituja ovat lasikuidut, hiilikuidut ja aramidikuidut (Saarela ym. 2003, s. 19). Muovikomposiitista valmistettuja putkia kappaleita voidaan jatkaa haluttuun pituuteen liitoskappaleiden avulla. Muovikomposiittiputkia voidaan työstää työmaalla lähes kaikilla vastaavilla menetelmillä kuin teräspanputkia (Saarela ym. 2003, s. 214).

Tutkimuksen tavoitteet

Tämän diplomityön tavoitteena oli selvittää, voidaanko muovikomposiittiputkia käyttää maahan asennettuina kantavina putkirakenteina niin, etteivät niiden ominaisuudet merkittävästi huonone käytössäolon aikana. Muovikomposiitin kelpoisuutta tutkittiin kirjallisuustutkimuksena sekä kokeellisilla kuormituksilla ja elementtilaskentaohjelmalla. Kirjallisuustutkimuksessa tutkittiin, mitkä tekijät vaikuttavat heikentävästi muovikomposiittiputken materiaaliominaisuuksiin. Laskennallisen ja kokeellisen tarkastelun pääpainona oli tutkia kantokestävyyttä putken muodonmuutoksien avulla.

Tutkimuksen rajaukset

Muovikomposiittiputkia on mahdollista valmistaa lukematon määrä eri muovimateriaalien ja lujitteiden kombinaatioina. Näin ollen työ rajattiin muovikomposiittiputkiin, jotka on valmistettu lasikuiduilla vahvistetusta tyydyttymättömästä polyesteristä. Maan ja putken välistä yhteistoimintaa tutkittiin yhdellä putkikoolla. Yhteistoimintaa tarkastel-

tiin putkelle, jonka ulkohalkaisija oli 2160 mm ja seinämävahvuus 47 mm. Putken ympärystäytön osalta keskityttiin pelkästään kalliomurskeeseen. Hetkellisissä maan ja putken välisessä yhteistoiminnassa tarkasteltiin kokeellisesti ja laskennallisesti pelkästään kolmi- ja neliakselisten kuorma-autojen avulla. Lisäksi laskennallisessa osuudessa rajattiin dynaaminen tarkastelu työn ulkopuolelle.

2 Muovikomposiittiputket

2.1 Materiaali ja valmistustavat

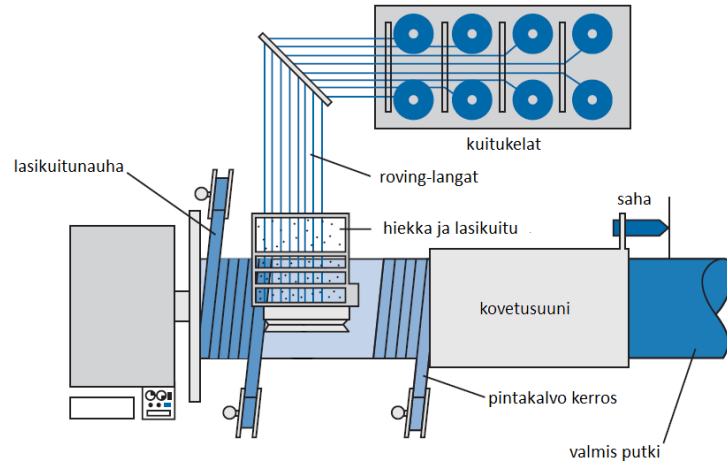
Muovikomposiittiputket valmistetaan tavallisesti lasikuiduilla vahvistetusta kertamuovista. Lisäksi putkien valmistuksessa voidaan käyttää kvartsihiekkaa lisäämään putken jäykkyyttä. Kvartsihiekan käyttäminen putkessa vaatii kehittynyttä valmistustekniikka. Kertamuovin perusraaka-aineena on nestemäinen hartsi, joka lämmön avulla kovetetaan kiinteäksi aineeksi. Kovettumisen jälkeen kertamuoveja ei voi enää muovata lämmön avulla molekyyliarakennetta tuhoamatta. Muovikomposiittiputkissa käytettyjä kertamuoveja ovat tyydyttymättömät polyesterit ja epoksit, joista eniten käytettyjä ovat tyydyttymättömät polyesterit niiden edullisen hinnan ja käyttöominaisuuksien takia. Erikoiskohteissa käytetään epoksia sisältäviä putkia. (Saarela ym. 2003, s. 14, 35, 374; Hobas 2014a, s. 4, 10; Amiantit 2014a, s. 2; Amiantit 2014b, s. 3.)

Tyydyttymättömät polyesterit valmistetaan kahdesta komponentista: tyydytettyjen ja tyydyttymättömien happojen ja tyydytettyjen alkoholien muodostamasta polyesteristä sekä tyydyttymättömästä monomeeristä. Polyesterin ja monomeerin keskinäisessä kovettumisreaktiossa syntyy ristikkäissidoksista koostuva kova hartsi, jonka ominaisuudet riippuvat käytetyistä raaka-aineista. Tyydyttymättömä polyesteriä voidaan siis valmistaa useita eri tyyppejä. Yhteisiä ominaisuuksia kaikille polyesterityypeille ovat muun muassa kirkas tai kellertävä väri, hyvä kemiallinen kestävyys sekä tarttuvuus, kovuus, jäykkyys, helppo työstettävyys sekä mahdollisuus käyttää suuria määriä lujitetta. (Saarela ym. 2003, s. 37-43; Karo 1970, s. 9-40; Seppälä 2005, s. 147-148.) Kovettuneen polyesterin tyypillisiä vetolujuuden arvoja ovat 50-85 MPa ja vetomoduulin arvo ovat 3,2-2,5 GPa (Saarela ym. 2003, s. 43).

Muovikomposiittien lujitteena yleensä käytettävä lasikuitutyyppi on E-lasia. E-lasi on kalkki-alumo-borosilikaattilasiasia, jonka kosteudenkestävyys on tavallista alkalilasia parempi pienen alkalipitoisuuden takia. E-lasin alkalipitoisuus on alle 1 %. (Karo 1970, s. 41.) Noin 99 % kaikista valmistetusta lasikuidusta on E-lasia, sillä sen mekaaniset ominaisuudet ja kemiallinen kestävyys ovat hyvät. Lisäksi E-lasin hinta on edullinen. E-lasin tyypillinen vetolujuuden arvo on noin 3,6 GPa. Happamissa olosuhteissa komposiitissa käytetään putkivalmistaja riippuen joko C-lasia tai ECR-lasia. ECR-lasi on muunnos E-lasista, missä yhdistyvät E-lasin hyvät mekaaniset ominaisuudet sekä C-lasin korroosiokestävyys. Muovikomposiiteissa käytettävän lasikuidun paksuus vaihtelee käyttötarkoituksesta riippuen 3-17 µm välillä. Lasikuituja käytetään muovikomposiittiputken valmistusmenetelmästä riippuen jatkuvana roving-lankana, lasikuitunauhana tai katkottuina kuituina. Katkottujen kuitujen pituus vaihtelee 0,2–13 mm välillä. (Saarela ym. 2003, s. 74-75; Seppälä 2005, s. 124-125.)

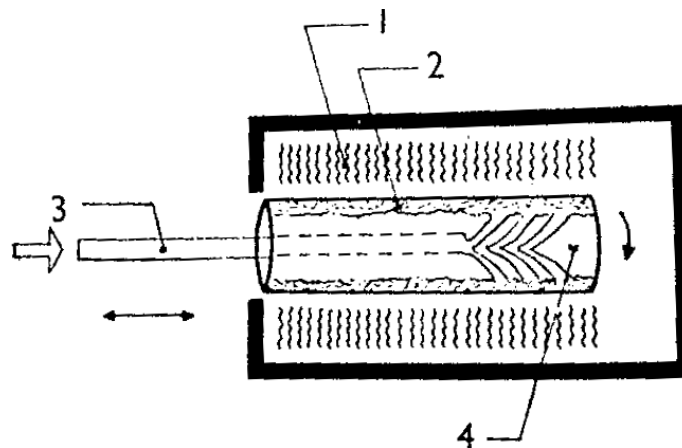
Muovikomposiittiputket valmistetaan kahdella menetelmällä: kuitukelauksella ja rotaatiovalulla. Kelausmenetelmässä jatkuvat roving-langat tai lasikuitunauhat kastetaan polyesterissä, jonka jälkeen ne ohjataan pyörivän muotin ulkopinnalle. Roving-langat kelataan muotin päälle siten että se antaa mahdollisimman suuren lujuuden haluttuihin suuntiin. Näin ollen langat kelataan yleensä putken päälle vinottaisessa kulmassa tietyn kaavan mukaisesti. Kelauksen yhteydessä on mahdollista ruiskuttaa hiekkaa putken seinämän keskikohdalle lisäämään putken jäykkyyttä. Kun riittävä seinämävahvuus saavutetaan, putki viimeistellään asentamalla ulkopintaan hartsia sisältävä suojakerros. Lo-

puksi putki kovetetaan infrapunalämmittimillä tai uunilla. Kelausmenetelmä mahdollistaa muidenkin kuin pyörähdyssymmetristen kappaleiden valmistamisen. (Karo 1970, s. 97-98; Saarela ym. 2003, s. 162-164; Amiantit 2014c s. 5.) Kuvassa 2.1 on esitetty kelausmenetelmän periaate.



2.1. Kuitukelausmenetelmä. (Amiantit 2014b, s. 3.)

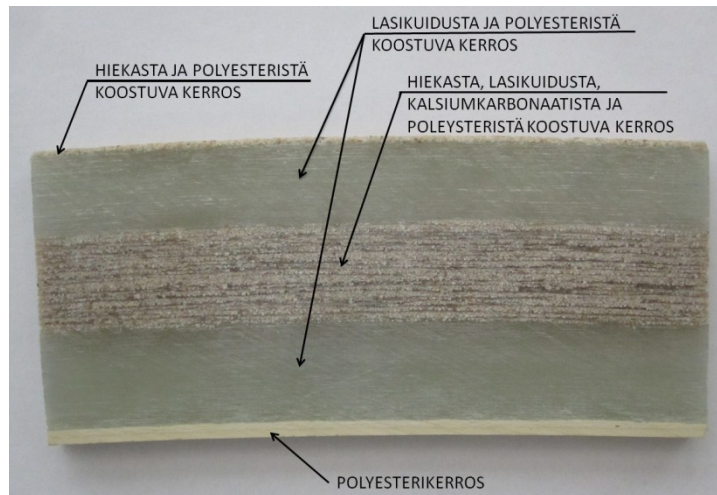
Rotaatiovalussa putken valmistamiseen käytetään putken muotoista pyörivää muottia ja tietokoneohjattua syöttölaitetta. Rotaatiovaluprosessissa syötetään tyydyttymätön polyesteri, lasikuitu sekä hiekka tarkoin määritettyinä kerroksina pyörivän pyörähdyssymmetrisen muotin sisäpinnalle syöttölaitteen avulla. Muottia pyöritetään suurella nopeudella, jotta eri materiaalikerrokset kiinnittyvät tiukasti toisiinsa ja lujuusominaisuuksia pienentävä ilma saadaan poistettua materiaalista. Materiaalikerrosten syöttämisen jälkeen muotin ulkopintaa lämmitetään polyesterin kovettumisreaktion aikaansaamiseksi. Lopuksi muotti jäähdytetään ja kovettunut putki poistetaan muotista. Valmistusprosessin ansiosta putken molemmista pinnoista muodostuu sileitä. (Saarela ym. 2003, s. 179; Seppälä 2005, s. 303.) Kuvassa 2.2 on esitetty rotaatiovalun valmistusperiaate.



Kuva 2.2. Rotaatiovalu: 1) Lämmityselementit. 2) muovilla kostutettu lujite, 3) muovin syöttö ja 4) pyörivä ontto muotti. (Karo 1970, s. 108.)

Muovikomposiittiputken seinämät koostuvat yleensä neljästä erilaisesta kerroksesta: kahdesta lasikuitukerroksesta, putken ulkopinnan hiekkakerroksesta, putken sisäpinnan polyesterikerroksesta sekä putken seinämän keskellä sijaitsevasta hiekan, kalsiumkarbonaatin ja lasikuidun yhdistelmäkerroksesta. Lasikuitukerrosten tarkoitus on toimia putkea lujittavina kerroksina. Putken seinämän keskellä sijaitseva hiekan, kalsiumkar-

bonaatin ja lasikuidun muodostama kerros lisää putken jäykkyyttä ja puristuskestävyyttä. Putken sisäpinnan polyesterikerros suojaa putken muita kerroksia kemiakaaleilta. Putken ulkopinnan tehtävänä on suojata putken sisäkerroksia muun muassa auringon valolta ja mekaaniselta kulutukselta. (Hobas 2014a, s. 12.) Kuvassa 2.3 on esitetty rotaatiovalulla valmistetun Hobas putken seinämän rakennekerrokset.



Kuva 2.3. Hobas putken seinämän rakennekerrokset.

2.2 Materiaaliominaisuudet

Muovikomposiitin ominaisuudet määräytyvät käytetyistä raaka-aineista ja niiden seossuhteista, kuitujen pintaominaisuuksista, pituudesta ja suuntauksesta. Valmistusprosessissa syntyneet viat vaikuttavat komposiitin ominaisuuksiin. Valmistusvikoja ovat muun muassa kertamuovin epätäydellinen kovettuminen, huokoisuus ja epätasaisesta lujitejakautumasta aiheutuva komposiitin epähomogeenisuus. (Saarela ym. 2003, s. 231-238.)

Muovikomposiitin seossuhteista tärkein on lujitepitoisuus. Lujituspitoisuuden käytännön ylärajana voidaan pitää 70 tilavuusprosenttia. Lähelle tätä ylärajaa päästään kelausmenetelmällä, kun lujitteet on asetettu yhdensuuntaisiksi. Jatkuvista ja yhdensuuntaisista lujitteista koostuva komposiitti kestää suuria kuormia lujitteiden suunnassa. Jännitys-venymäkäyttäytyminen on lähes lineaarista murtokuormaan asti. Lujitteita vastaan kohtisuorassa suunnassa sekä leikkauskuormituksessa lujitteiden jäykistävä ja lujittava vaikutus on pieni, jolloin murtuminen tapahtuu pienillä kuormilla. Lujitteita vastaan kohtisuorassa suunnassa komposiitin ominaisuudet määräytyvät sekä muovimatriisin ominaisuuksista että kuitu-matriisi-sidoksen lujuuden mukaan. (Saarela ym. 2003, s. 239-243.)

Lujitteiden suuntauksella on merkittävä vaikutus lujuuteen. Jos lujitteiden suuntaus poikkeaa yksisuuntaisessa laminaatissa 15 asteen verran, voi kappaleen lujuus heiketä jopa 50 %. Yleensä kappaleeseen kohdistuu useampi kuormitusmuoto samanaikaisesti. Tällöin on edullista suunnatta eri kuitukerrokset ristiin. (Laine & Järvelä 1989, s. 20-21.) Katkokuituja sisältävässä komposiitissa kuidut ovat satunnaisesti suuntautuneet muovimatriisiin. Näin ollen komposiitin mekaaniset ominaisuudet ovat likimain samantyyppiset kaikissa suunnissa. Pienillä kuormituksilla komposiitti käyttäytyy lineaarisesti. Komposiitin venymän noustessa 0,1-0,3 % arvoon ensimmäiset muovimatriisi- ja sidosvauriot syntyvät, jolloin jännitysvenymäkäyrä muuttuu voimakkaasti epälineaariseksi.

Lopullinen murtuminen tapahtuu kun vaurioitumisaste on riittävän korkea. (Saarela ym. 2003, s. 251-252.) Taulukossa 2.1 on esitetty katkokuiduista valmistettujen putkien tyyppisiä pitkäaikaisominaisuuksia.

Taulukko 2.1. Rotaatiovalulla valmistetun putken pitkäaikaisominaisuudet. (Hobas 2014b, s. 43.)

Materiaaliominaisuus	Yksikkö	Suunta	
		Kehän suuntainen	Pituussuuntainen
Vetomoduuli	MPa	10000 - 15000	10000 - 12000
Vetolujuus	MPa	90 - 130	15 - 40
Murtovenymä, veto	%	1,2 - 1,5	0,25
Poisson luku	-	0,3	0,25
Puristusmoduuli	MPa	12000 - 18000	12000 - 18000
Puristuslujuus	MPa	130 - 140	90 - 100
murtovenymä, puristus	%	1,2 - 1,5	1,8 - 2,0
Taivutusmoduuli	MPa	10000 - 15000	-
Taivutuslujuus	MPa	120 - 140	15 - 40
murtovenymä, taivutus	%	1,6 - 2,2	1,0

Valmistusprosessilla on oleellinen vaikutus komposiittiputken huokoisuuteen. Kuitukelauksessa suurin osa huokosista muodostuu kuitujen kasteluvaiheessa. Tutkimuksissa on kuitenkin havaittu, että alipaineen käyttö vähentävän huokosten määrää huomattavasti. (Laitila ym. 1991, s. 4, 12.) Rotaatiovalussa muotin suuri pyörimisnopeus pakottaa rakennekerrokset tiukasti yhteen, jolloin rakennekerroksista puristuu kokonaan haitallinen ilma pois (Hobas 2014a, s. 12). Huokoisuudella on vähäinen vaikutus muovikomposiitin jäykkyyteen. Kuitujen suuntainen jäykkyys ei juuri muutu, mutta poikittainen jäykkyys ja leikkausjäykkyys muuttuvat hieman. Muovimatriisilla on vähäinen vaikutus komposiitin vetolujuuteen, joten matriisin huokoisuudella on vain pieni vaikutus vetolujuuteen. Puristuslujuuteen ja kerrosten väliseen leikkauslujuuteen huokoisuudella on merkittävä vaikutus. (Laine & Järvelä 1989, s. 19; Laitila ym. 1991, s. 14-19; Saarela ym. 2003, s. 253.) Tutkimuksissa on huomattu leikkauslujuuden pienenevän noin 7 % kutakin huokospitoisuuden prosenttia kohden aina 6 % huokospitoisuuteen asti (Laine & Järvelä 1989, s. 32).

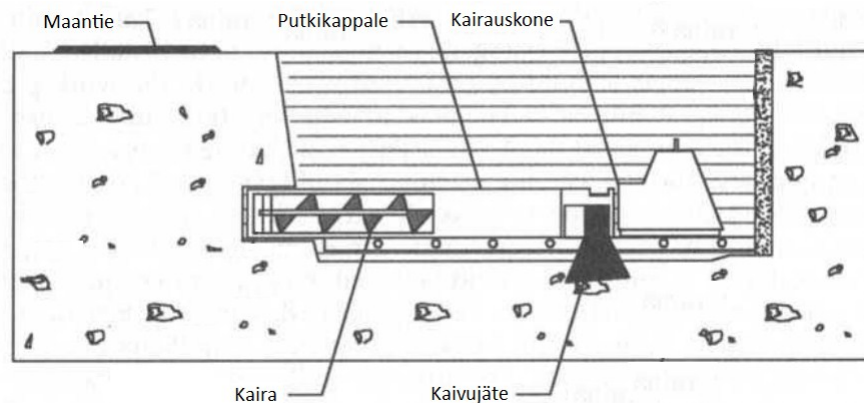
Muovimatriisin kovettumisreaktion täydellisyys vaikuttaa merkittävästi muovikomposiitin kaikkiin ominaisuuksiin. Matriisin kovettumislämpötila pitää olla yli 60 °C, jotta muovimatriisi kovettuu tyydyttävästi. Matriisin lujuus voi laskea jopa puoleen, jos matriisin jäännösstyreenipitoisuus on noin 6 %. Jälkikovettamisella varmistetaan polymeeroitusreaktion onnistuminen. (Laine & Järvelä 1989, s. 20.)

2.3 Putkien asennus ja liitostekniikka

Muovikomposiittiputki voidaan asentaa penkereeseen joko hydraulisella tunkkauksella tai kaivutyönä. **Tunkkausmenetelmä** voidaan suorittaa vasaraporausmenetelmällä, auger porauksella, suojaputken avulla, tai mikrotunneloitimenetelmällä. Tunkkausmenetelmiä käytettäessä liikennettä ei tarvitse pysäyttää putken asennuksen ajaksi Yksittäisten putkien pituus tunkkauksessa voi olla 1 m, 2 m, 3 m tai 6 m. Hydraulisen tunkin ja muovikomposiittiputken välissä käytetään putken otsapinta-alan kokoista tunkkauskappaletta välittämään tunkkausvoima tasaisesti putkelle. (Hobas 2014c, s. 2, 4.)

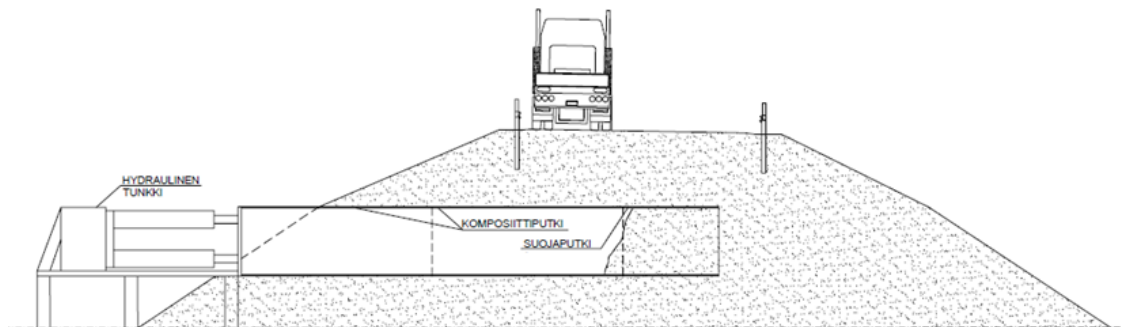
Vasaraporausmenetelmässä penkereeseen asennetaan ensiksi teräsputkista koostuva putkilinja, jonka jälkeen varsinainen muovikomposiittiputki tunkataan teräsputkilinja perään. Teräsputkien vasaraporausessa teräsputken kärkeen kiinnitetään iskevä vaakapora, joka murskaa edellä olevan maa-aineksen putken sisään. Maa-aines poistetaan teräsputken sisältä ruuvikuljettimien ja paineilman avulla. (PRS 2014.) Vasaraporausmenetelmää soveltuu käytettäväksi kalliomaaperissä sekä ongelmallisissa sekamaissa, jotka voivat sisältää louhetta, suuria kiviä, soraa sekä savea. Vasaraporausmenetelmä soveltuu käytettäväksi putkille, joiden ulkohalkaisija on 168-1420 mm. (Lännen Alituspalvelu 2014.)

Auger porauksessa tunkattavan muovikomposiittiputken sisällä käytetään kairaa helpottamaan muovikomposiittiputken tunkkausta sekä poistamaan maa-aines muovikomposiittiputken sisältä. Auger porauksessa muovikomposiittiputken päässä käytetään teräksistä karkiosaa estämään putken vaurioituminen tunkkauksen aikana. (CUIRE 2004, s. 24-26.) Auger poraus soveltuu käytettäväksi koheesio- ja hiekkamaille sekä putkille, joiden ulkohalkaisija on 272-2250 mm (Litokorpi 2013, s. 17). Auger menetelmä ei sovellu käytettäväksi pohjaveden alapuolella (Bizier 2007, s. 403). Kuvassa 2.4 on esitetty auger porauksen periaate.



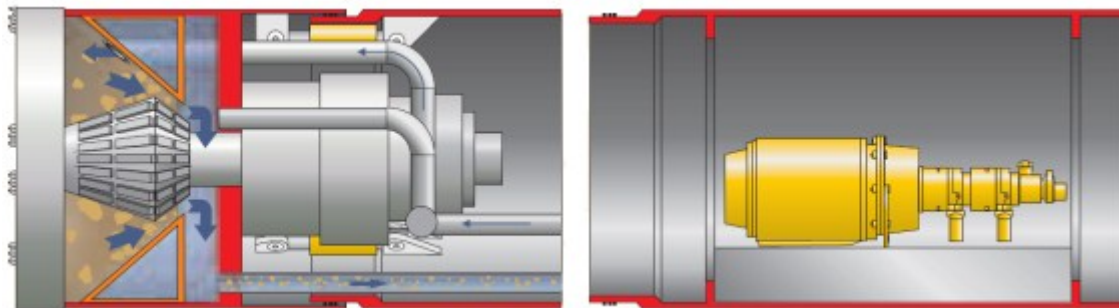
Kuva 2.4. Auger porausmenetelmä. (CUIRE 2004, s. 38.)

Suojaputken avulla suoritettussa tunkkausmenetelmässä muovikomposiittiputken pää suojataan projektikohtaisesti suunnittelulla teräksisellä putkella, jonka halkaisija on yhtä suuri kuin varsinaisella muovikomposiittiputkella. Suojattu komposiittiputki tunkataan penkereeseen, jonka jälkeen suojattu putki tyhjennetään maa-aineksesta. Tyhjennyksen jälkeen suojatun putken perään tunkataan yksittäisiä putkikappaleita. Putkikappaleiden muodostamaa putkijonoa tunkataan projektikohtaisesti suunnitellun syklin verran eteenpäin. Jokaisen syklin jälkeen putki tyhjennetään maa-aineksesta. Tunkkausta jatketaan tällä periaatteella koko penkereen läpi. Tunkkauksessa käytettävän teräksisen putken tarkoitus on suojata muovikomposiittiputken päätä sekä estää maan sortuminen. Näin ollen teräksisen suojaputken pituus määräytyy asennusolosuhteiden mukaan. (Birch & Updyke 2008, s. 390; Bizier 2007, s. 404-407.) Suojaputken avulla suoritettu tunkkausmenetelmää soveltuu käytettäväksi ulkohalkaisijaltaan 272-3600 mm putkille (Litokorpi 2013, s. 17). Kuvassa 2.5 on esitetty suojaputkella suoritettu tunkkaus.



Kuva 2.5. Suojaputkella suoritettu tunkkaus.

Mikrotunnelointimenetelmässä käytetään tunkattavien putkien edessä louhintaputkea. Louhintaputken kärjessä on sähkömoottorilla toimiva louhintalautanen, jota voidaan ohjata paineilman avulla. Mikrotunneloinnin aikana louhintalautaselle ruiskutetaan bentoniittia voiteluaineeksi sekä kuljettamaan louhittu maa-aines putkilinjan sisällä kulkevan putkistoon ja edelleen kiintoaine-erottimeen, josta bentoniitti palautuu syöttölinjaa pitkin takaisin louhintalautaselle ruiskutettavaksi. Asennuksen aikana bentoniittia on mahdollista myös ruiskuttaa putken ulkopinnalle pienentämään maan ja putken välistä kitkaa. (MTS 2014, s. 5-6; Brich & Updyke 2008, s. 390-392; Bizier 2007, s. 410.) Ohjattava louhintaputki mahdollistaa putkilinja asentamisen rakennettujen infrarakenteiden alapuolelle sekä kaarevien putkilinjojen teon (Hobas 2014c, s. 10-11). Mikrotunnelointi soveltuu käytettäväksi kaikissa maalajeissa sekä putkille, joiden ulkohalkaisija on 272-3600 mm (Litokorpi 2013, s. 17). Kuvassa 2.6 on esitetty mikrotunneloinnissa käytettävän louhintaputken ja erillisen voimalaiteyksikön rakenneleikkaukset.



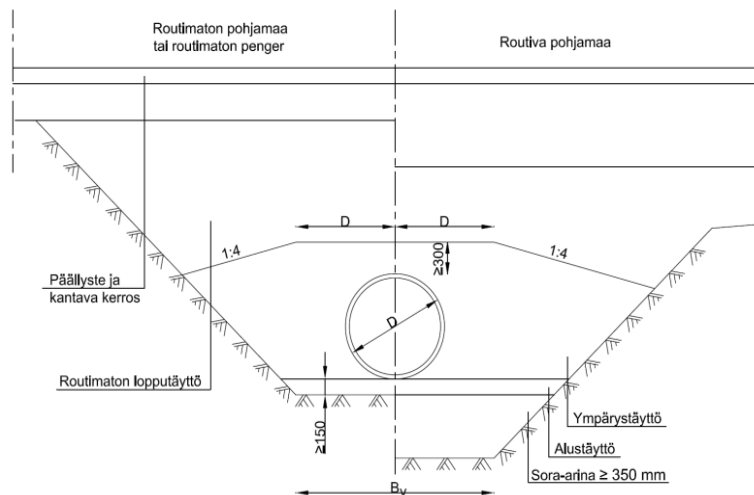
Kuva 2.6. Mikrotunneloinnissa käytettävä louhintaputki sekä voimalaiteyksikkö. (MTS 2014, s. 5.)

Muovikomposiittiputket asennetaan **kaivutyönä** samoilla periaatteilla kuin teräsputket. Muovikomposiittiputken asentaminen kaivutyönä sisältää seuraavat työvaiheet: kaivutyön, alustäytön teon, putken asentamisen, ympäristötäytön teon ja viimeistelyn (Tiehallinto 2008, s. 18). Kaivannon poikkileikkauksen koko ja muoto riippuu putken asennussyvyydestä, putken koosta sekä maapohjasta. Kaivannon pohja kaivetaan tarpeeksi suureksi niin, että täyttömateriaalin tiivistäminen putken vierellä pystytään tekemään asianmukaisesti. (RIL 2013, s. 17.) Liitteessä 1 on esitetty kaivannon ohjeellisia luiskakaltevuuksia. Taulukossa 2.2 on esitetty kaivannon vähimmäisleveyden B_v arvoja putken ulkohalkaisijan D suhteen. Taulukossa 2.2 β_k on kaivannon luiskakaltevuus.

Taulukko 2.2. Kaivannon vähimmäisleveys. (SFS 1998, s. 10.)

D [mm]	Tuettu kaivanto	Tukematon kaivanto	
		$\beta_k > 60^\circ$	$\beta_k \leq 60^\circ$
$D \leq 200$	$B_v = D + 0,4 \text{ m}$	$B_v = D + 0,4 \text{ m}$	$B_v = D + 0,4 \text{ m}$
$200 \leq D \leq 350$	$B_v = D + 0,5 \text{ m}$	$B_v = D + 0,5 \text{ m}$	$B_v = D + 0,4 \text{ m}$
$200 \leq D \leq 350$	$B_v = D + 0,7 \text{ m}$	$B_v = D + 0,7 \text{ m}$	$B_v = D + 0,4 \text{ m}$
$200 \leq D \leq 350$	$B_v = D + 0,85 \text{ m}$	$B_v = D + 0,85 \text{ m}$	$B_v = D + 0,4 \text{ m}$
$D > 1200$	$B_v = D + 1,0 \text{ m}$	$B_v = D + 1,0 \text{ m}$	$B_v = D + 0,4 \text{ m}$

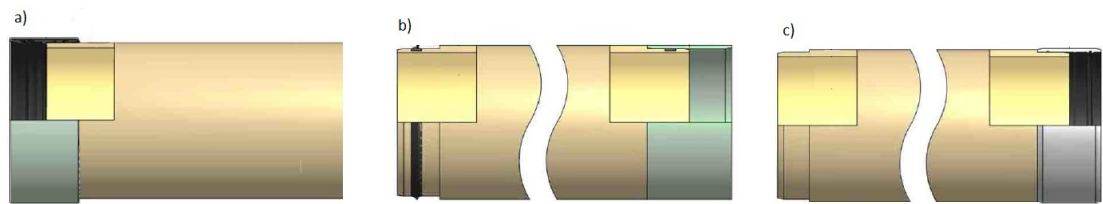
Routimattomilla pohjamailla kaivannon pohjalle levitetään vähintään 150 mm paksuinen alustäyttökerros sorasta tai murskeesta. Routivilla pohjamailla kaivannon pohjalle tehdään sora-arinakerros, jonka paksuus on vähintään 350 mm. Tämän jälkeen arinakerroksen päälle levitetään alustäyttö. (RIL 2000, s. 105-106.) Alustäytön suurin raekoko saa olla korkeintaan 32 mm. Alustäytön yläpinta muotoillaan pituus- ja poikittaissuunnassa putken muotoiseksi ja putkien liitoskohdille tehdään alustäyttöön syvennykset. Syvennyksien tarkoitus on helpottaa putkien liittämistä ja liitosvyöhykkeiden tarkastamista. Putken asennuksen jälkeen ympärystäytön teko aloitetaan sullomalla soraa tai mursketta putken alle molemmilta puolilta samanaikaisesti. Sullominen kuitenkin tehdään niin, ettei putki pääse nousemaan alustäytöltä. Varsinainen ympärystäyttö tehdään 200-300 mm vaakasuorina kerroksina samanaikaisesti putken molemmilla puolilla. Jokainen kerros tiivistetään huolellisesti koko kaivannon pituudelta. Putken päällä tiivistäminen suoritetaan vasta, kun peitesyvyys on vähintään 300 mm. (RIL 2013, s. 22-25; Tiehallinto 2008, s. 18.) Lopputäytönä käytetään tiivistyskelpoista kiviainesmateriaalia, jonka rakeisuus on mahdollisimman sekarakeista tyhjiä tilojen välttämiseksi. Lopputäytön suurin sallittu kivien tai lohcareiden läpimitta on 2/3 kerralla tiivistettävän kerroksen paksuudesta. (RIL 2000, s. 42.) Kuvassa 2.7 on esitetty kaivutyönä tehdyn putkikaivannon rakennekerrokset.



Kuva 2.7. Putkikaivannon rakennekerrokset. (Mukailtuna RIL 2000, s. 105.)

Muovikomposiittiputkien yhdistämisessä käytetään muhvikappaleita, jotka ovat yleensä valmiiksi asennettu tehtaalla putkien toiseen päähän. Muhvikappaleen liitostekniikka putkeen riippuu asennusmenetelmästä. Tunkkausmenetelmässä käytetään muhvikappaleita, jotka asennetaan kavennettuun putken päähän. Tällöin putkilinjan ulkohalkaisija ei muutu liitoksen kohdalla. Kaivumenetelmässä käytetään vastaavasti muhvikappaletta, joka asennetaan kaventamattoman putken päähän. Tunkkaus- ja kaivumenetelmässä

käytetään muhvikappaleita, jotka on valmistettu lasikuiduilla vahvistetusta tyydyttymättömästä polyesteristä. Lisäksi tunkkausmenetelmässä on mahdollista käyttää ruostumattomasta teräksestä valmistettuja muhvikappaleita, jotka mahdollistava suuremman tunkkausvoiman käytön. Muhviliitoksissa käytetään yleensä etyleenipropyyleeni-kumitiivistettä varmistamassa putken tiiveyden sekä putkilinjan yhtenäisen toiminnan. Saastuneilla maa-alueilla käytetään etyleenipropyyleeni-kumitiivisteen sijaan nitriliili-kumitiivisteitä. Kumitiiviste mahdollistaa kaarevien putkilinjojen teon. (Hobas 2014b, s. 6-10; Hobas 2014c, s. 5.) Sallittu kulma vaihtelee 0,5-3 asteeseen välillä putken ulkohalkaisijasta riippuen. Ulkohalkaisijaltaan yli 1800 mm putkille sallitaan 0,5 asteen kulma. (Litokorpi 2013, s. 14.) Kuvassa 2.7 on esitetty muhvien asennus putkeen.

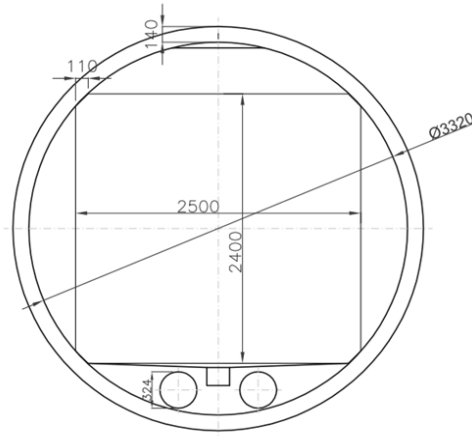


Kuva 2.8. Muhvin asennus: a) vahvistettu polyesterimuhvi kaventamattomassa putkessa, b) vahvistettu polyesterimuhvi kavennetussa putkessa, c) Teräsmuhvi kavennetussa putkessa. (Hobas 2014b, s. 8, 10.)

Ennen kahden putken liittämistä tiiviste ja liitettävän putken pää on puhdistettava ja voideltava silikonivoiteella. Putket voidaan liittää toisiinsa kaivinkoneen tai kuorma-
liinon avulla. Asennuksen ajaksi työnnettävän putken pää tulee suojata vaurioitumiselta esimerkiksi puulankuilla. Liittämisen aikana tulee varmistua, että putkeen kohdistuva voima jakaantuu tasaisesti putken päähän. (Amiantit 2014d, s. 13-14.)

2.4 Sovelluskohteet

Muovikomposiittiputkia voidaan käyttää monenlaisissa sovelluskohteissa materiaaliominaisuuksien ja valmistusmenetelmien ansiosta. Muovikomposiittiputkia voidaan valmistaa ulkohalkaisijaltaan 0,15-3,6 m. (Hobas 2014c, s. 4.) Ulkohalkaisijaltaan 3,6 m putki soveltuu käytettäväksi kevyen liikenteen alikulusiltana, johon on mahdollista mahdollistaa erilaista tekniikkaa putken sisälle. Muovikomposiittiputket soveltuvat lisäksi käytettäväksi vesi- ja viemäriputkina, paine- ja kaasuputkien suojaputkina sekä korjauskohteissa, joissa korjattavaa putkilinjaa ei voi rakentaa uudelleen putkilinjaa ympäröivien rakenteiden takia. Korjauskohteissa muovikomposiittiputket sujutetaan korjattavan putkilinjan sisälle työntämällä tai vetämällä. Komposiittiputken ja korjattavan putkilinjan välinen ilmatila täytetään injektointiaineella, jolloin varmistetaan kuorman välittyminen vanhalta putkelta muovikomposiittiputkelle. (Hobas 2014d, s. 2.) Kelausmenetelmällä on mahdollista valmistaa monimutkaisia profiileja, joten muovikomposiittiputki soveltuu käytettäväksi myös muihinkin kuin pyörähdysymmetrisiin kohteisiin. Kuvassa 2.9 on esitetty ulkohalkaisijaltaan 3,6 m putken käyttö alikulusiltana.



Kuva 2.9. Ulkohalkaisijaltaan 3,6 m putken käyttö alikulusiltana. (Litokorpi 2013, s. 34.)

3 Muovikomposiitin vanhenemiseen vaikuttavat tekijät

3.1 Kemikaalien vaikutus

Muovikomposiitin kemikaalikestävyys riippuu komposiitissa käytetystä tyydyttymättömän polyesterihartsin tyypistä. Komposiiteissa yleisesti käytetty E-lasi on herkkä hapoille ja emäksille. (Pritchard 2000, s. 100.) Hartsien kemikaalikestävyys paranee yleisesti ottaen järjestyksessä ortohtaatti-, isohtaatti-, neopentyyli glykoli- ja bisfenolipolyesterit (Airasmaa ym. 1984, s. 266). Tyydyttymättömät polyesterit kestävät yleisesti suhteellisen hyvin vettä, vahvoja emäksiä, heikkoja happoja, rasvoja, öljyä sekä monia orgaanisia liuottimia. (Seppälä 2005, s. 150; Siikanen 2009, s. 258.)

Lasikuidun ja polyesterin muodostama komposiitti kestää huomattavasti tislattua vettä kuin tavallista vettä tai suolaliuosta, sillä komposiitin polyesterikerros toimii puoliläpäisevänä kalvona, joka läpäisee liuotinta laimeasta liuoksesta väkevämpään. Lasin käsitte-lyaineesta ja hartsin sisältämistä epäpuhtauksista liukenee aina osa lasikuidun ja hartsin rajapintaan päässeisiin vesimolekyyleihin. Tällöin rajapintaan muodostuu väkevempi liuos, joka vetää puoleensa lisää vesimolekyylejä. Näin ollen lasin ja polyesterin rajapintaan syntyy painetta, joka voi kasvaa niin suureksi, että hartsi irtoaa lasikuidusta. Mikäli komposiitin ulkopuolella on pysyvästi laimeampaa liuosta esimerkiksi tislattua vettä, jatkuu komposiittiin turmeltuminen kiihtyen, sillä komposiittiin muodostuu yhä enemmän paineellisia kammioita. (Karo 1970, s. 142.)

Lasikuidulla vahvistetun polyesterin veden ja kemikaalien kestävyyttä yleensä parannetaan lisäämällä komposiittirakenteen pinnalle hartsikerros (Pritchard 2000, 192; Saarela ym. 2003, s. 100). Pintahartsin tyyppi riippuu käyttökohteesta, mutta yleisimmin käytettyjä ovat isohtaattihappo-, neopentyyli glykoli- ja bisfenoli-pohjaiset hartsit. Pintahartsin paksuutena käytetään tavallisesti 0,4-0,7 mm. (Saarela ym. 2003, s. 101.) Pintahartsin vaikutusta komposiitin kestävyYTEEN on melko paljon tutkittu vedellä muovikomposiittien käyttökohteiden takia. Säänkestävyyteen perustuvissa tutkimuksissa on havaittu, että pintahartsillisten komposiittien lujuudet eivät muuttuneet 2,5 vuoden aikana normaaleissa ulkoilma olosuhteissa. Pinnoittamattomilla komposiiteilla tehdyissä kokeissa on havaittu komposiitin lujuuden laskeneen noin 3-5 % neljässä vuodessa. (Saarela ym. 2003, s. 256.)

Orgaaniset kemikaalit sekä hapettavat ja pelkistävät liuokset vaikuttavat suoraan polyesterihartsiin eivätkä hartsin ja lasikuiden välisiin sidoksiin. Orgaanisista kemikaaleista voimakkaimmin vaikuttavat styreeni, tolueeni, asetoni ja bentseeni. Toisaalta mineraalitärpätti, bensiini, pellavaöljy ja öljyhappo eivät vaikuta polyesterihartsiin. Hapettavia happoja polyesteri ei kestä ollenkaan. (Karo 1970, s. 143-144.) Taulukossa 3.1 on esitetty yleisesti tyydyttymättömän polyesterin kestävyys eri kemikaaliryhmillä.

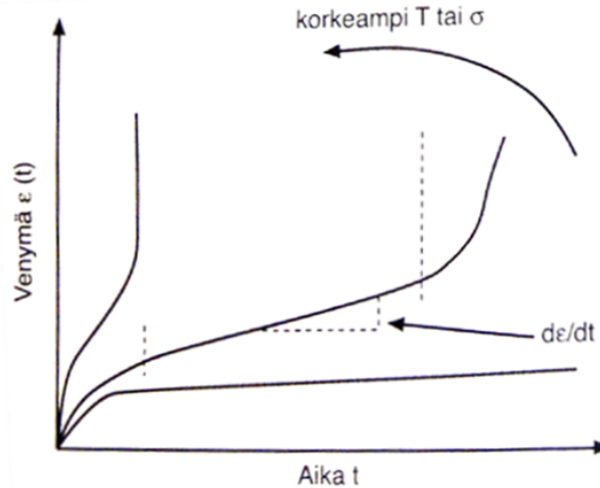
Taulukko 3.1. Tyydyttymättömän polyesterin kemiallinen kestävyys: 0 = ei kestä, 1 = kestää huonosti, 2 = kestää kohtalaisesti, 3 = kestää melko hyvin, 4 = kestää. (Siikanen 2009, s. 258.)

Kemikaaliryhmät	Tyydyttymättömän polyesteri	Kemikaaliryhmät	Tyydyttymättömän polyesteri
vesi	3	Klooratut hiilivedyt	2
Suolaliuokset	4	Alkoholit	4
Heikot hapot	2	Esterit	2
Vahvat hapot	0	Ketonit	1
Hapettavat hapot	0	Eetterit	2
Fluorihappo	0	Aromaattiset hiilivedyt	0
Vahvat orgaaniset hapot	0	Bensiini	4
Heikot emäkset	4	Voiteluaineseokset	4
Vahvat emäkset	4	Mineraaliöljyt	4
Alifaattiset hiilivedyt	4	Rasvat ja öljyt	4
Tyydyttymättömät klooratut hiilivedyt	0	Terpeenit	2

3.2 Mekaaninen rasitus

Muovikomposiitin käyttöikään vaikuttavia mekaanisiin rasituksia ovat viruminen ja väsyminen, jotka tulee ottaa huomioon rakenteita mitoittaessa (RIL 1996, s. 57). **Virumisella** tarkoitetaan kappaleessa ajan mukana tapahtuvaa muodonmuutoksen kasvamista kuorman pysyessä vakiona (Mäkeläinen 1980, s. 119). Muovit ovat viskoelastisia materiaaleja, joiden muodonmuutos on osittain palautuvaa, mutta ajasta riippuvaa. Viskoelastisessa muodonmuutoksessa yhdistyvät viskoosi ja elastinen muodonmuutos. (RIL 1996, s. 54.) Muovien viskoosi muodonmuutos on muovimolekyylien hidasta liukumista toisiinsa nähden. Muovikomposiitin lujittamiseen käytetyt lasikuidut ovat käytännössä täysin virumattomia. Näin ollen muovikomposiitin viruminen on hartsimatriisin virumista. Virumisen suuruus riippuu siis oleellisesti kuinka paljon muovimatriisiin kohdistuu kuormaa. Suurilla pitkäaikaiskuormituksilla osa kasvavista muodonmuutoksista johtuu lisääntyvistä matriisiaineen säröilystä sekä kuitujen ja matriisin välisten sidosten peittämisestä. (Saarela ym. 2003, s. 263; Johnson 1979, s. 54.) Muovikomposiitin muovimatriisissa tapahtuu virumista, kun siihen kohdistuu veto-, puristus- tai taivutuskauormitusta (Seppälä 2005, s. 72).

Viruminen on tyypillisesti kolmivaiheinen prosessi, jossa syntyy pysyviä muodonmuutoksia. Alussa viruminen on voimakasta, jonka jälkeen seuraa tasaisen virumisen vaihe. Lopuksi viruminen kiihtyy, kunnes muovikomposiitti pettää. Kuormitustason suuruus ja ympäristöolosuhteet vaikuttavat virumisnopeuteen. Lämpötilan nousu nopeuttaa kappaleen virumista samaan tapaan kuin kuormitustason nousu. Alhaisilla kuormitustasoilla viruminen on hidasta eikä yleensä johda muovikomposiitin pettämiseen. (Saarela ym. 2003, s. 262.) Kuvassa 3.1 on esitetty kuormitustason ja lämpötilan vaikutus muovikomposiitin virumiseen.



Kuva 3.1. Kuormitustason ja lämpötilan vaikutus muovikomposiitin virumiseen. (Saarela ym. 2003, s. 262.)

Eräässä tutkimuksessa havaittiin katkokuiduilla vahvistetun polyesteri kappaleen murtuvan 100 tunnin jälkeen, kun kappaleeseen kohdistuva kuorma oli 75 % lyhytaikaisesta murtolujuudesta. Pienillä jännityksen tasoilla on havaittu venymän kasvavan lineaarisesti ajan suhteen. Ekstrapoloinnin avulla on todettu, että viruman aiheuttama venymä ei muodostu kriittiseksi, jos kappaleeseen kohdistuva vetojännitys on alle 25 % lyhytaikaisesta murtolujuudesta. (Johnson 1979, s. 61.)

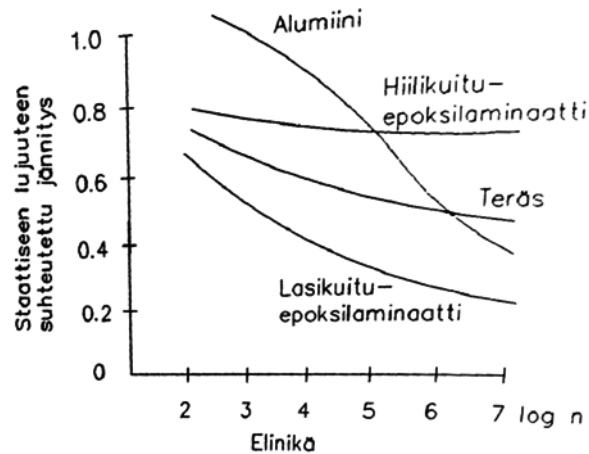
Lämpötilalla, kosteudella ja kemikaaleilla voi olla merkittävä vaikutus muovikomposiitin virumiseen. Vaikutus riippuu komposiitin rakenteesta ja kuormitustavasta. Jos kuormitus rasittaa merkittävästi muovimatriisia sekä kuitujen ja matriisin välisiä sidoksia, viruminen kasvaa selvästi lämpötilan ja komposiitin kosteussisällön kohotessa. Jos kuormitus rasittaa pääasiassa lujitekuituja, viruminen on vähäistä lämpötilasta ja komposiitin kosteudesta riippumatta. (RIL 1996, s. 67; Saarela ym. 2003, s. 263.)

Tutkimisissa on havaittu lasikuiduilla vahvistetuilla polyesterillä, että lämpötilan aiheuttaman virumisen suuruuteen vaikuttaa kriittisesti komposiitissa käytetty hartsin tyyppi. Ortoftaattipolyestereille on tutkimuksissa mitattu venymän arvoksi 1 %, kun kappaletta kuormitettiin 30 MN/m^2 suuruisella kuormituksella 1000 tunnin ajan 20 asteen lämpötilassa. Isoftaattipolyesterille vastaavasti mitattiin vain 0,56 % venymän arvo. Näin ollen hartsin virumiskestävyys paranee samassa järjestyksessä kuin kemiallinen kestävyys eli ortoftaattipolyesteristä bisfenolipolyesteriin. (Johnson 1979, s. 65.)

Väsymisellä tarkoitetaan materiaalin heikkenemistä toistuvan kuorman vaikutuksesta (Johnson 1979, s. 68). Muovikomposiitin väsyminen on lähinnä muovimatriisin heikkenemistä ja hidasta mekaanisten vaurioiden kasvua. Kuorman toistuvuuden vaikutus lujitteisiin on varsin vähäinen. Muovikomposiitin väsymisvaurioitumisessa voidaan erottaa kolme päävaihetta: säröjen yhdistymisvaihe, säröjen kasvu ja komposiitin lopullinen murtuminen. (Saarela ym. 2003, s. 254.)

Katkokuiduilla vahvistettujen muovinen väsymiskestävyys on tyypillisesti vaatimatonta. Jatkuvilla kuiduilla vahvistetun muovikomposiittien väsyminen vaihtelee materiaalista ja komposiittirakenteesta riippuen. Lujitteiden suunnassa kuormitettujen jatkuvakuituisien väsymiskestävyys on hyvä. (RIL 1996, s. 72; Saarela ym. 2003, s. 260.) Kuvassa 3.2 on vertailtu väsymiskestävyydeltään parhaiten yhdensuuntaislaminaattien väsymislu-

juuksia alumiinin ja teräksen arvoihin. Käyrät kuvaavat suhteellisia lujuuksia vetoväsymyksessä. Kuvan 3.2 mukaisesti lasikuiduilla vahvistetun epoksimuovin suhteellinen väsymislujuus on huomattavasti alhaisempi kuin muilla vertailumateriaaleilla. Hiilikuitulaminaatin ja lasikuitulaminaatin suhteellinen väsymislajuuden ero johtuu lujitteiden jäykkyyseroista.



Kuva 3.2. Kuitulujitteisten komposiittien ja metallien väsymislajuuskäyriä. (RIL 1996, s. 72.)

Lasikuitukomposiittien vetolujuustutkimuksissa on havaittu vetolujuuden vähenevän logaritmisella asteikolla noin 10 % jokaista dekaadia kohti eli kun kuormitusten lukumäärä kymmenkertaistuu. Tutkimuksien mukaan lasikuitukomposiiteille suhteellista vetoväsymislajuutta voidaan karkeasti arvioida kaavalla (3.1) (Saarela ym. 2003, s. 260)

$$\sigma_s = \sigma_{vm} - B_s \cdot \log N, \quad (3.1)$$

missä σ_s on väsymislujuus (MPa), σ_{vm} staattinen vetomurtolujuus (MPa) ja B_s on verrannollisuuskerroin (MPa), jolle tutkimuksessa on saatu likiarvo $B_s = 0,1\sigma_{vm}$.

Muovikomposiitin väsymislajuuteen vaikuttaa kuormituksen suuruuden ohella valmistusprosessi ja käyttöympäristö. Valmistusprosessissa jäänyt huokoisuus tai hartsin vajaa kovettuminen alentaa pitkäaikaislujuutta. Huokoisuudella on suuri vaikutus muovikomposiitin väsymiseen, sillä jännityskeskittymien takia huokokset ovat komposiitissa säröjen alkupisteitä. Käyttöympäristön lämpötilalla ja kosteudella on merkittävä vaikutus väsymislajuuteen, kun kuormitus kohdistuu matriisiin sekä kuitujen ja matriisin välisiin sidoksiin. (RIL 1996, s. 73-74.)

3.3 Jännityssäröily ja jännityssäröilykorroosio

Jännityssäröilyssä kappaleeseen muodostuu mekaanisen rasituksen seurauksena mikrohalkeamia, jotka voivat lopulta kuormituksen kasvaessa aiheuttaa murtumiseen johtavia säröjä (Mäkeläinen 1980, s. 98-99). Useat nesteet nopeuttavat säröjen muodostumista tunkeutumalla mikrohalkeamiin. Tällöin tapahtumaa kutsutaan ympäristötekijöiden aiheuttamaksi jännityssäröilyksi. Jännityssäröilyä edistäviä nesteitä ovat pooliset aineet kuten vesi, etanoli ja ammoniakki. (Seppälä 2005, s. 88.) Komposiitin kohdistuva jännitys voi aiheuttaa ulkoisista voimista tai valmistuksessa aiheutuvista sisäisistä jännityksistä. Komposiitin muovimatriisi pyrkii säröytymään kuormitusta vastaan kohtisuorassa suunnassa, mutta kuitenkin lopullisen suunnan määrää komposiitin kuitujen suunta.

Komposiiteille on ominaista, että lujitteet pyrkivät ehkäisemään särön kasvua. (Mäkeläinen 1980, s. 98; Seppälä 2005, s. 88.) Jännityssäröily on muovimatriisin vetojännitysten puoleisessa pinnassa esiintyvä fysikaalinen ilmiö, jonka luonnetta ei ole vielä pystytty täysin selittämään. On esitetty, että nestemäinen tai kaasumainen aine tunkeutuu muovimatriisin molekyylien väliin heikentäen matriisin välisiä sidosvoimia. (Seppälä 2005, s. 88-89.) Jännityssäröjen muodostumisessa on erittäin olennaista aika- ja lämpötilariippuvuus (Mäkeläinen 1980, s. 98).

Syövyttävissä olosuhteissa säröilykohta reagoi väliaineen kanssa aiheuttaen jännityssärökorroosiota (Mäkeläinen 1980, s. 98-99). E-lasi kestää huonosti happamia liuoksia, joten E-lasilla vahvistetut polyesterit ovat alttiita jännityssärökorroosiolle. Emäksisissä ympäristöissä ei ole havaittu jännityksen ja nesteen yhteisvaikutuksesta aiheutuvaa jännityssärökorroosiota. Emäksisessä ympäristössä on havaittu vain E-lasin lujuuden heikkenemistä. (Pritchard 2000, s. 100-101.) Suurin todennäköisyys jännityssärökorroosion esiintymiseen E-lasilla vahvistetussa polyesterissä on happoliuoksessa, jonka pH arvo on noin 0. Hartsin murtumissitkeys määrää halkeaman kasvunopeuden komposiitissa (Pritchard 2000, s. 104). Tyydyttymättömän polyesterin murtumissitkeys pienenee hartsin kemikaalikestävyyden lisääntyessä. Näin ollen ei ole jännityssärökorroosion kannalta optimaalista valita polyesterihartsi tyyppiä, jolla on paras kemikaalikestävyys tai vastaavasti paras murtumissitkeys. (Pritchard 2000, s. 104.)

Kuitujen suuntauksella sekä pintahartsilla voidaan parantaa sekä jännityssärökestävyyttä että jännityssärökorroosiokestävyyttä. Pintahartsin tyyppi tulee olla sama kuin varsinaisten rakennekerrosten, sillä näiden kerrosten välinen tartunta saattaa irrota kuormituksessa. Kelausmenetelmässä kappaleen valmistuksessa optimaalinen kelauskulma on ± 53 astetta jännityssäröilyn kannalta. Kelausmenetelmässä pintahartsissa voidaan käyttää C-lasia tai ECR-lasia kemikaalikestävyyden parantamiseksi. Rotaatiovalulla voidaan valmistaa erittäin sitkeä pintahartsi, jonka murtovenymä on 25 %. Lisäksi rotaatiovalulla valmistetun kappaleen pintahartsissa ei tarvita lasikuituja säröilyn ehkäisemiseksi. (Pritchard 2000, s. 107-108.)

3.4 Ultraviolettisäteilyn ja lämpötilan vaikutus

Muovikomposiitin lämmönkestävyyden sekä ultraviolettisäteilyn kestävyys määrää komposiitin matriisimuovi. **Ultraviolettisäteily** on sähkömagneettista säteilyä, jonka osuus auringon kokonaissäteilystä on noin 5-6 %. Maanpinnalle tulevan ultraviolettisäteilyn aallonpituus on 290-400 nm ja sen sisältämä energia on riittävän suuri katkoamaan useimpien orgaanisten aineiden sidoksia. Polyesterin sidosten hajottamiseen tarvitaan säteily, jonka aallonpituus on 315 nm. (Pankakoski ym. 1992, s. 8, 10-11.) Näin ollen polyesteri haurastuu altistuessaan auringon valolle. Lisäksi auringon valon sisältämä ultraviolettisäteily muuttaa hartsin väriä kellertäväksi. Polyesterin haurastumista ja kellastumista estetään UV-stabilisaattoreilla. Riittävä lisäys on 0,1-0,3 % hartsin määrästä. (Karo 1970, s. 141.)

Lämpötilan muutos vaikuttaa merkittävästi muovikomposiitin materiaaliominaisuuksiin. Muoveille on ominaista lämpötilan noustessa pehmeneminen ja lämpötilan laskiessa haurastuminen. Lämpötilaa, jossa muovi pehmenee, kutsutaan taipumislämpötilaksi. Taipumislämpötilassa komposiitin ominaisuudet alkavat radikaalisesti muuttua. Taipumislämpötila ei kuitenkaan suoraan kuvaa komposiiteille sallittavaa lämpötilaa, sillä se

on määritetty lyhytaikaisissa kokeissa. (Saarela ym. 2003, s. 235.) Taulukossa 3.2 on esitetty hartsityyppien taipumislämpötilat.

Taulukko 3.2. Hartsityyppien taipumislämpötilat. (Saarela ym. 2003, s. 43.)

	Polyesterihartsityyppi			
	Ortoftaali	Isoftaatti	Neopentyyli glykoli	Bisfenoli
Taipumislämpötila °C	55-100	75-130	90-115	120-135

Komposiitille sallittu lämpötila määräytyy muun muassa kuormituksen suuruudesta ja kuinka kauan komposiittiin kohdistuu korkeita lämpötiloja. Tyypillisesti muovikomposiitin korkein mahdollinen käyttölämpötila on 20-30 astetta taipumislämpötilan alapuolella. (Saarela ym. 2003, s. 235.) Muovikomposiitin viruminen nopeutuu pitkäkestoisessa lämpökuormituksessa (Johnson 1979, s. 160). Muovikomposiitin lujuusominaisuudet paranevat huoneenlämpötilaa matalimmissa lämpötiloissa. Lasikuiduilla vahvistetulle polyesterille on mitattu -30 asteen lämpötilassa noin 8-16 % suurempia taivutusmoduulin arvoja kuin 20 asteen lämpötilassa. (Johnson 1979, s. 159.) Taulukossa 3.3 on esitetty bisfenolipolyesteristä valmistetun komposiitin lyhyt aikaisia lujuusominaisuuksia eri lämpötiloissa. Bisfenolinpolyesterin taipumislämpötila on 100 °C.

Taulukko 3.3. Bisfenolipolyesteristä valmistetun komposiitin lyhyt aikaisia lujuusominaisuuksia eri lämpötiloissa. (Mark ym. 1988, s. 277.)

Lujuusominaisuudet [MPa]	Lämpötila			
	20 °C	50 °C	80 °C	100 °C
Taivutuslujuus	193	151	107	27
Taivutusmoduuli	6896	6206	4827	2068
Vetolujuus	103	82	57	20
Vetomoduuli	7586	6896	5862	3448

Tyydyttymätön polyesteri on palamisherkä korkean styreenipitoisuuden takia (Mark ym. 1988, s. 280). Polyesterin palavuutta voidaan vähentää käyttämällä palonestoaineita, mutta palonestovaikutuksen saamiseksi niitä pitää käyttää useita kymmeniä prosentteja. Näin suuret määrät palonestoainetta kuitenkin huonontaa muita materiaaliominaisuuksia. Tyydyttymättömän polyesterin palavuutta voidaan vähennetään käyttämällä yhtenä lähtöaineena runsaasti klooria sisältävää dikarboksyylihappoa. (Seppälä 2005, s. 121-122.)

3.5 Mikro-organismien vaikutus

Mikro-organismeihin kuuluu muun muassa bakteerit, levät, sienet ja virukset. Mikro-organismit voivat aiheuttaa muovikomposiittien vaurioitumisen usealla eri mekanismilla erikseen tai yhtä aikaan. (Kekki ym. 2008, s. 22.) Mikro-organismit voivat käyttää ravinnokseen muovin sisältämiä aineita tai voivat vaikuttaa kemiallisesti muoviaiaineeseen entsyymien ja aineenvaihduntatuotteina syntyneiden orgaanisten happojen avulla. (RIL 1985, s. 60.) Tyypillisiä mikro-organismien muodostamia happoja ovat rikkihappo, typpihappo ja hiilihappo. Rikkihappoa tuottaa erityisesti Thiobacillus-bakteerisuku ja niitä esiintyy tavallisesti happamissa sulfaattimaissa. (Kekki ym. 2008, s. 22-23.) Tehokkaimmin mikro-organismit toimivat lämpimissä ja kosteissa olosuhteissa (Pankakoski ym. 1992, s. 8, 16). Tyydyttymättömästä polyesteristä valmistettu muovikomposiitilla

on taulukon 3.1 mukaan rajoittunut kestävyys happoja vastaan. Näin ollen tyydyttymättömistä polyestereistä valmistettujen muovikomposiittiputkien käyttöä tulee välttää olosuhteissa, joissa on mahdollista esiintyä happoja tuottavia bakteereja.

Mikro-organismit pystyvät käyttämään hyväkseen pienimolekyyllisiä muoveja, joiden suhteellinen moolimassa on korkeintaan 500 g/mol (RIL 1985, s. 60). Muovikomposiiteissa käytetty tyydyttymättömän polyesterin keskimääräinen moolimassa on 1000-5000 g/mol (RIL 1985, s. 29). Mikro-organismit eivät siis vaikuta komposiitin sisältämään tyydyttymättömään polyesteriin, mutta muovikomposiiteissa käytetyt lisäaineet kuten liukuaineet, stabilisaattorit ja varsinkin eräät pehmitinaineet voivat hajota mikro-organismien vaikutuksesta. Tätä hajoamista vastaan voidaan kuitenkin suojautua valitsemalla lisäaineet mikro-organismeja vastustavaksi. (RIL 1985, s. 61.)

4 Putkirakenteen laskentamenetelmät

4.1 Analyttiset menetelmät

4.1.1 Pystysuora maanpaine

Maan ja putken yhteistoiminta voi muodostua monella eri kuormitustavalla. Putkeen kohdistuvan pystysuuntaisen maanpaineen suuruuteen vaikuttaa, kuinka paljon putki ja maakerrokset putken päällä painuvat verrattuna vieressä oleviin maakerroksiin. Tavalliset putkeen kohdistuvat kuormat ovat (Korhonen 1963, s. 15-16)

- ajoneuvokuorma
- täytemaakuorma
- passiivimaanpaine
- pohjavedenpaine.

Täytemaakuorma

Marstonin teorian mukaan (Handy & Spangler 2007, s. 742) putkeen kohdistuva täytemaasta aiheutuva pystysuuntainen maanpaine voidaan laskea joko kaivanto-olosuhteissa tai pengerolosuhteissa. **Kaivanto-olosuhteissa** putki ja maakerrokset putken päällä painuvat enemmän kuin vierellä olevat maakerrokset. Teorian oletuksena on, että kaivanto on kapea, kaivannon seinämät ovat pystysuorat ja putken harjalle kohdistuva pystysuora maanpaine jakautuu tasaisesti kaivannon leveydelle. Putken ja sen päällä olevan täytemaan painuessa täytemaakuorma jakautuu osittain kaivannon seinämille kitkan vaikutuksesta, jolloin putkeen kohdistuva kuormitus muodostuu pienemmäksi kuin täytemaan paino putken päällä. (Korhonen 1963, s. 16-19; Jääskeläinen 1973a, s. 12-13; Rahman 2010, s. 36-38.) Kapeassa kaivannossa syntyvää maanpainetta kutsutaan hautapaineeksi. (RIL 1990, s. 186.) Kaivanto-olosuhteissa täytemaan aiheuttama pystysuora maanpaine lasketaan kaavalla (4.1) (Korhonen 1963, s. 17)

$$\sigma_{vk} = \frac{\gamma_t B}{2\mu K_a} \left(1 - e^{-2K_a \mu \left(\frac{H}{B}\right)}\right) \quad (4.1)$$

missä σ_{vk} on putkeen kohdistuva pystysuora maanpaine kaivannossa (MPa)

B on kaivannon leveys (m)

H on peitesyvyys (m)

K_a on aktiivinen maanpainekerroin $= \tan^2(45^\circ - \frac{\varphi_t}{2})$

φ_t on täytemaan kitkakulma ($^\circ$)

μ on kitkakerroin $= \tan(\varphi_{lt})$

φ_{lt} on luiskan ja täytemaan välinen kitkakulma ($^\circ$)

γ_t on täytemaan tilavuuspaino (kN/m^3).

Joustavaan putkeen kohdistuva täytemaakuorma saadaan Spanglerin mukaan (Handy & Spangler 2007, s. 747) kertomalla kaava (4.1) putken halkaisijalla, jolloin täytemaakuorma lasketaan kaavalla (4.2) (Jääskeläinen 1973a, s. 13)

$$P_{vtk} = \frac{\gamma_t B D}{2\mu K_a} \left(1 - e^{-2K_a \mu \left(\frac{H}{B}\right)}\right), \quad (4.2)$$

missä P_{vtk} on joustavaan putkeen kohdistuva täytemaakuorma kaivannossa (MN/m) ja D on putken ulkohalkaisija (m).

Jäykkiin putkiin kohdistuva täytemaakuorma saadaan taas kertomalla kaava (4.1) kaivannon leveydellä. Tällöin jäykkään putkeen kohdistuva täytemaakuorma kaivannossa lasketaan kaavalla (4.3) (Jääskeläinen 1973a, s. 13)

$$P_{vjk} = \frac{\gamma_t B^2}{2\mu K_a} \left(1 - e^{2K_a \mu \left(\frac{H}{B}\right)}\right). \quad (4.3)$$

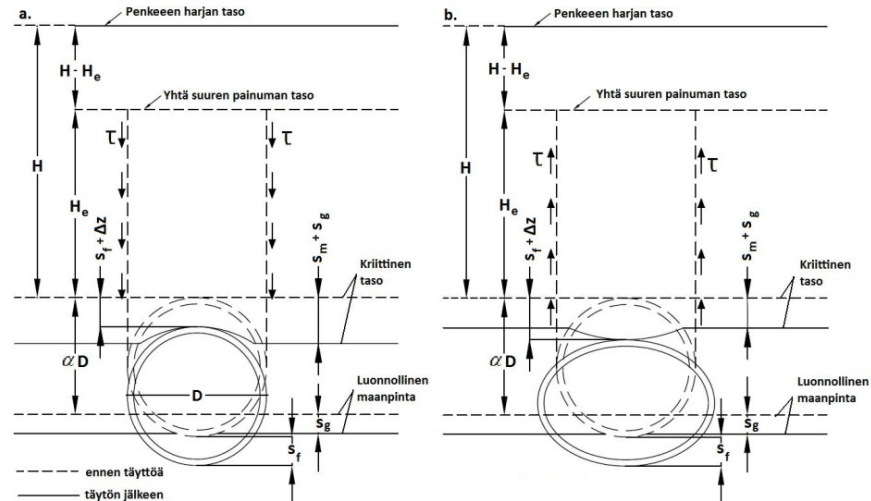
Pengerolosuhteissa putki ja maakerrokset putken päällä painuvat vähemmän kuin vieressä olevat maakerrokset. Tällöin putken sivujen kautta kulkeviin pystysuoriin liukupintoihin vaikuttaa alaspäin suuntautuvat kitkavoimat, jotka keräävät ympäröivästä täytemaasta kuormaa putken päälle. Näin ollen kuormitus putken päälle voi muodostua paljon suuremmaksi kuin maamassan paino putken päällä. Myös leveäpohjaisissa kaivannoissa pengervaikutus voi tulla kyseeseen. Näin ollen puhutaan täydellisestä tai epätäydellisestä pengervaikutuksesta. Epätäydellisessä pengervaikutuksessa putken kautta kulkevat liukupinnat eivät ulotu maanpintaan saakka. Liukupintojen oletetaan ulottuvan korkeudelle H_e , jossa putken yläpuolisen täytemaan painuma on yhtä suuri kuin putken vieressä. (Korhonen 1963, s. 19-23; Jääskeläinen 1973a, s. 13-15; Rahman 2010, s. 36-38.) Kuvassa 4.1 on esitetty epätäydellinen pengervaikutus. Täydellisessä ja epätäydellisessä pengervaikutuksessa putkeen kohdistuva pystysuora maanpaine lasketaan kaavalla (4.2)

$$\sigma_{vp} = \frac{\gamma_t D}{\pm 2\mu K_a} \left(e^{\pm 2K_a \mu \left(\frac{H_e}{D}\right)} - 1\right) + \gamma_t (H - H_e) e^{\pm 2K_a \mu \left(\frac{H_e}{D}\right)}, \quad (4.4)$$

missä σ_{vp} on putkeen kohdistuva pystysuora maanpaine penkereessä (MPa)
 D on putken ulkohalkaisija (m)
 H_e on yhtäsuuren painuman tason etäisyys putken harjalta (m).

Marston on johtanut kaavan (4.5) korkeuden H_e määrittämiseksi painumasuhteen r_{sp} avulla. Kaavan (4.5) painumasuhde voi olla positiivinen tai negatiivinen. (Korhonen 1963, s. 21.) Kuvassa 4.1 on esitetty kaavassa (4.5) käytetyt merkinnät.

$$\left\{ \begin{aligned} & \left[\frac{1}{2\mu K_a} \pm \left(\frac{H}{D} - \frac{H_e}{D} \right) \pm \frac{\alpha r_{sp}}{3} \right] \frac{e^{\pm 2K_a \mu \left(\frac{H_e}{D}\right)} - 1}{\pm 2\mu K_a} \\ & \pm \frac{1}{2} \left(\frac{H_e}{D} \right)^2 \pm \frac{\alpha r_{sp}}{3} \left(\frac{H}{D} - \frac{H_e}{D} \right) e^{\pm 2K_a \mu \left(\frac{H_e}{D}\right)} \\ & - \frac{1}{2\mu K_a} \frac{H_e}{D} \mp \frac{H H_e}{D^2} = \alpha r_{sp} \frac{H}{D} \end{aligned} \right. \quad (4.5)$$



Kuva 4.1. Epätäydelliset pengerosuhteet. a) positiivinen painumasuhde, b) negatiivinen painumasuhde. (Korhonen 1963, s. 20.)

Kaavassa (4.5) esiintyvä painumasuhde r_{sd} lasketaan kaavalla (4.6) (Jääskeläinen 1973a, s. 14; Rahman 2010, s. 38)

$$r_{sp} = \frac{(s_m + s_g) - s_f + \Delta z}{s_m}, \quad (4.6)$$

missä r_{sp} on painumasuhde (-)
 s_m on täytemaan painuma putken vieressä (mm)
 s_g on maapohjan painuma putken vieressä (mm)
 s_f on maapohjan painuma putken alla (mm)
 Δz on putken kokoonpuristuma (mm).

Kaavoissa (4.4) ja (4.5) käytetään positiivisia merkkejä kun painumasuhde on positiivinen ja negatiivisia merkkejä kun painumasuhde on negatiivinen. Joustavien putkien muodonmuutos on yleensä suurempi kuin täytemaan putken vieressä, jolloin painumasuhde on tavallisesti negatiivinen joustaville putkille. (Korhonen 1963, s. 21; Jääskeläinen 1973, s. 14; Rahman 2010, s. 40.) Taulukossa 4.1 on esitetty painumasuhteen likimääräiset arvot, jotka Spangler on määrittänyt jäykillä ja joustaville putkille eri käyttöolosuhteissa.

Taulukko 4.1. Painumasuhteen likimääräiset arvot Spanglerin mukaan. (Korhonen 1963, s. 23; Jääskeläinen 1973, s. 15.)

Käyttöolosuhteet	r_{sp}
Kalliolle tai painumattomalle maapohjalle asennetut jäykät putket	+ 1,0
Tiiviille maapohjalle asennetut jäykät putket	+ 0,5 ... + 0,8
Löyhälle maapohjalle asennetut jäykät putket	0 ... + 0,5
Löyhällä täytemaalla peitetyt joustavat putket	- 0,4 ... 0
Tiiviiksi sullotulla täytemaalla peitetyt joustavat putket	-0,2 ... + 0,8

Joustaville putkille, kuten muovi- ja lujitemuoviputkille, voidaan maanpohjan painuma putken vieressä (s_g) ja putken alla (s_f) pitää merkityksettömänä verrattuna putken kokoonpuristumaan, jolloin kaava (4.6) supistuu muotoon (Jääskeläinen 1973, s. 14)

$$r_{sp} = 1 - \frac{\Delta z}{s_m}. \quad (4.7)$$

Täytemaan painuma putken vieressä lasketaan kaavalla (4.8) (Jääskeläinen 1973a, s. 14):

$$s_m = \frac{\alpha D \gamma_t}{E_s} \left(H + \frac{D}{2} \right), \quad (4.8)$$

missä α on projektiosuhde, katso kuva 4.1 (-)
 E_s on ödometrikokeen avulla määritetty sekanttimoduuli (MPa).

Koemittausten perusteella on todettu täytemaakuorman asettuvan joustavilla putkilla pitkän ajan kuluessa samaksi kuin maamassan paino putken päällä (Jääskeläinen 1973a, s. 27-29). Näin ollen joustaville putkille voidaan käyttää painumasuhteen arvoa nollaa. Joustavaan putkeen kohdistuva täytemaakuorma lasketaan siten kaavalla (4.9) (Rahman 2010, s. 40)

$$P_{vtp} = H \gamma_t D. \quad (4.9)$$

Jäykille putkille on todettu, että Voellmyn kimmoteorian mukainen laskukaava on tarkka jäykille putkille kun putkimateriaalin kimmomoduuli on huomattavasti suurempi kuin maan kimmomoduuli putken ympärillä. Jäykkiin putkiin kohdistuva täytemaakuorma penkereessä lasketaan siten kaavalla (4.10) (Korhonen 1963, s. 25-27)

$$P_{vjp} = \frac{5}{3} D \gamma_t H. \quad (4.10)$$

Ajoneuvokuorma

Marston (1930), Spangler ja Hennesy (1946) ovat osoittaneet, että ajoneuvokuorman aiheuttama putkeen kohdistuva pystysuuntainen maanpaine voidaan laskea Boussinesqin teorialla. Köglerin ja Scheidigin (1928) mukaan pyöräkuorma voidaan katsoa piste-kuormaksi, jos ympyrän muotoisen kuormitusalan halkaisija on korkeintaan kolmasosa siitä syvyydestä, jossa jännitykset lasketaan. (Korhonen 1963, s. 29.) Pystysuora maanpaine maanpinnan alapuolella syvyydessä Z lasketaan kaavan (4.11) avulla

$$\sigma_{QZ} = \frac{3 \cos^5 \beta}{2 \pi Z^2} Q, \quad (4.11)$$

missä σ_{QZ} on pyöräkuorman aiheuttama pystysuora maanpaine (MPa)
 Q on pistekuorma (kN)
 β on maanpaineen leviämiskulma (°).

Ajoneuvokuormasta aiheutuvat maamassan jännitykset eivät yleensä ole lähellä murto-rajaa, joten maan muodonmuutokset putken ympärillä ovat tavallisesti pieniä. Näin ollen putkeen kohdistuvat pystykuorma voidaan laskea riittävällä tarkkuudella kimmoteoriaan perustuvilla kaavoilla. (Korhonen 1963, s. 24, 44.) Putkeen kohdistuva pystykuorma lasketaan kaavalla (4.12)

$$P_{QZ} = \frac{3 \cos^5 \beta}{2\pi Z^2} \frac{5 + 3 \frac{E_m}{E_p} \left(\frac{r_p}{s}\right)^3}{\left(1 + \frac{E_m}{E_p} \left(\frac{r_p}{s}\right)^3\right) \left(3 + \frac{E_m}{E_p} \left(\frac{r_p}{s}\right)^3\right)} QD, \quad (4.12)$$

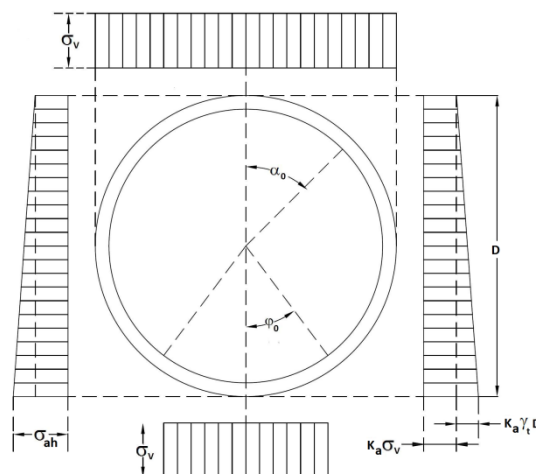
missä P_{QZ} on putkeen kohdistuva pystykuorma pyöräkuormasta (MN/m)
 E_m on maamateriaalin kimmomoduuli putken ympärillä (MPa)
 E_p on putkimateriaalin kimmomoduuli (MPa)
 r_p on putken säde (m)
 s on putken seinämän paksuus (m).

4.1.2 Maanpaineen jakautuminen

Maanpaineen jakautumiseen, suuntaan ja suuruuteen vaikuttaa muun muassa putken jäykkyys sekä putken ja maan keskinäinen liike. Jos putken sivut pullistuvat kuormituksen johdosta maamassaan päin, putken sivuilla maanpaine kasvaa, kunnes saavutetaan rajatila, jota kutsutaan passiiviseksi maanpaineeksi. Jos putken sivut vastaavasti litistyvät maamassasta poispäin, putken sivuilla maanpaine saavuttaa yleensä pienimmän mahdollisen arvonsa, jota kutsutaan aktiiviseksi maanpaineeksi. Liikkumattomassa putkirakenteessa maanpaine putken sivuilla on lepopaineen suuruinen. Putken liikkuminen maassa tai putkessa tapahtuvat muodonmuutokset muuttavat putkeen kohdistuvaa maanpaine jakautumaa. Jäykkien ja joustavien putkien maanpaine jakaumat ja niiden laskenta eroavat toisistaan vaakasuuntaisen maanpaineen laskennan osalta. (Korhonen 1963, s. 31.)

Jäykät putket

Jäykiksi putkiksi luokitellaan putket, joiden rengaspoikkipinta ei huomattavasti muutu ulkoisesta kuormituksesta. Esimerkiksi teräsbetoniputkien muodonmuutokset ovat yleensä niin pieniä, että teräsbetoniputket voidaan katsoa jäykiksi putkiksi. Jäykkien putkiin kohdistuvat vaakasuuntainen maanpaine lasketaan klassisen maanpaineteorian mukaan aktiivisena maanpaineena. Kuvassa 4.2 on esitetty maanpaineen jakautuminen jäykän putken ympärillä kitkamaassa. Pystysuora maanpaine oletetaan jakautuvan yläpuolella tasaisesti koko putken leveydelle ja putken alapuolella tietyssä jakautumiskulmassa φ_0 . (Korhonen 1963, s. 31-32.)



Kuva 4.2. Maanpaine jakautuminen jäykän putken ympärillä. (Korhonen 1963, s. 32.)

Jäykän putken sivuille kohdistuva aktiivinen maanpaine lasketaan kaavalla (4.13) (Korhonen 1963, s. 32)

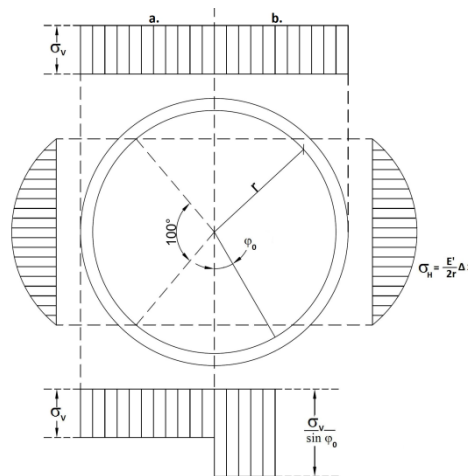
$$\sigma_{ah} = K_a \sigma_v + K_a \gamma_t D, \quad (4.13)$$

missä σ_{ah} on aktiivisen maanpaineen suuruus putken pohjan korkeudella (MPa)
 σ_v on putken harjan korkeudella vaikuttava pystysuora maanpaine (MPa).

Kaavassa (4.13) putken harjan korkeudella vaikuttava pystysuora maanpaine σ_v lasketaan olosuhteista riippuen kaavoilla (4.1), (4.4) tai (4.11) alaluvussa 4.1.1 esitetyllä tavalla. Kaava (4.13) ei ota huomioon putken ja maan muodonmuutoksia. Näin ollen kaavalla (4.13) voidaan laskea putkeen kohdistuva vaakasuuntainen maanpaine likimääräisesti. (Korhonen 1963, s. 32.)

Joustavat putket

Spangler esitteli (1941) maan ja putken yhteistoiminnan periaatteet. Spangler osoitti, että joustavan putken ympärille kehittyy vaakasuuntainen maanpaine vastustamaan putkessa tapahtuvia muodonmuutoksia. (Whidden 2009, s. 8.) Spangler on esittänyt suuri-kokoisilla aaltolevyrummuilla maanpaineen jakautuvan joustavien putkien ympärille kuvan 4.3 mukaisesti. Tutkimusten perusteella Spangler huomasi, että aaltolevyrumpujen poikkileikkaus on muodonmuutosten jälkeen lähes ellipsin muotoinen. Näin ollen vaakasuoraa maanpaineen jakautumista putken sivuilla voidaan approksimoida riittävällä tarkkuudella paraabelilla. (Jääskeläinen 1973a, s. 34.)



Kuva 4.3. Maanpaineen jakautuminen joustavien putkien ympärillä. (Jääskeläinen 1973a, s. 36.)

Spanglerin mukaan joustavien putkien sivuille kohdistuva maanpaine lasketaan kaavalla (4.14) (Jääskeläinen 1973a, s. 34)

$$\sigma_H = \frac{E'}{2r_p} \Delta x, \quad (4.14)$$

missä σ_H on putken sivuille kohdistuva vaakasuora maanpaine (MPa)
 E' on maan passiivivastusmoduuli (MPa)
 Δx on vaakasuora muodonmuutos (m)
 r_p on putken säde (m).

Kaavassa (4.14) esiintyvä vaakasuora muodonmuutos lasketaan kaavalla (4.15) (Whidden 2009, s. 9; Rathmayer ym. 1977, s. 71)

$$\Delta x = \frac{\theta_a \theta_b P_v r_p^3}{E_t I + 0,061 E' r_p^3} \quad (4.15)$$

missä P_v on putkeen kohdistuva pystysuora kuorma (MN/m)
 E_t on putkimateriaalin taivutuskimmomoduuli (MPa)
 I on putken seinämän jäyhyysmomentti (m⁴)
 r_p on putken säde (m)
 θ_a on ajasta ja putkimateriaalista riippuva kerroin (-)
 θ_b on tukireaktion jakautumiskulmasta riippuva kerroin (-).

Tiiveille penkereille voidaan kertoimen θ_a arvona käyttää 1,0 ja löyhille penkereille arvoa 1,5. Kertoimen θ_b suuruus vaihtelee 0,110-0,083 riippuen tukireaktion jakautumiskulman suuruudesta. (Whidden 2009, s. 9) Kaavoissa (4.14) ja (4.15) esiintyvä passiivivastusmoduuli E' kuvaa maan muodostamaa sivuttaistukea putkelle. Passiivivastusmoduulin suuruus riippuu muun muassa putken jäykkyydestä ja maan tiiveydestä. (Whidden 2009, s. 9.) Passiivivastusmoduuli E' lasketaan kaavan (4.16) avulla (Jääskeläinen 1973b, s.41)

$$E' = \frac{1-2\nu}{0,183(1-\nu)(5-6\nu)} E_s \quad (4.16)$$

missä ν on maa-aineksen poisson luku (-)
 E_s on ödometrikokeen avulla määritetty sekanttimoduuli (MPa).

Joustavan putken muodonmuutos ja vaakasuuntainen maanpaine voidaan laskea siis, kun tunnetaan putkeen kohdistuva pystysuora kuorma sekä passiivivastusmoduuli.

4.1.3 Maanpaineeseen ja sen jakautumiseen vaikuttavat tekijät

Putkeen kohdistuvan maanpaineen suuruuteen ja maanpaineen jakautumiseen putken ympärille vaikuttaa monet eri tekijät. Tavallisesti maanpaineeseen vaikuttaa monet tekijät samanaikaisesti, joten yhden tekijän suuruuden vaikutusta on usein vaikea arvioida. (Jääskeläinen 1973a, s. 49.) Tärkeimpiä maanpaineeseen vaikuttavat tekijät ovat

- putken jäykkyys
- asennusolosuhteet
- asennusmenetelmä
- täytemateriaali
- peitesyvyys
- sääolosuhteet
- aika.

Putkille tehtyjen kokeiden perusteilla putken jäykkyyden vaikutus maanpaineeseen ja sen jakautumiseen on ilmeinen. Braune, Cain & Jandan (1929) mittausten perusteella putken suurella taipuisuudella on merkittävä maanpainetta pienentävä vaikutus kitkamaassa. Maanpaineen jakautumisen osalta Gaube, Hofer & Müller (1969) ovat todenneet maanpaineen jakautuvan sitä tasaisemmin putken ympärille, mitä taipuisampi putki on. Putket voidaan jakaa taipuisuusominaisuudeltaan kolmeen luokkaan: joustavaan, puoli-

jäykkään ja jäykkään putkeen. Putken taipuisuus määritellään rengasjäykkyyden käänteisarvona. (Jääskeläinen 1973a, s. 20-23, 47, 49-50, 52.) Putken rengasjäykkyys lasketaan kaavalla (4.17) (Kainulainen 2003, s. 33)

$$S = \frac{1}{12} \frac{s^3}{d_m} E_t, \quad (4.17)$$

missä S on putken rengasjäykkyys (MPa)
 E_t on putkimateriaalin taivutuskimmomoduuli (MPa)
 s on putken seinämäpaksuus (m)
 d_m on putken keskihalkaisija (m).

Taulukossa 4.2 on esitetty taipuisuusluokkien raja-arvot Jääskeläisen (1973a) mukaan. Luokkien väliset arvot perustuvat putkeen kohdistuvaan maanpaineen suuruuteen. Kullekkin luokalle soveltuu alaluvussa 4.1.1 määritetyt pystysuoran maanpaineen laskentamenetelmät. (Jääskeläinen 1973a, s. 49.)

Taulukko 4.2. Putkien taipuisuusrajat. (Jääskeläinen 1973a, s. 10.)

Nimitys	Taipuisuusluku (1/MPa)
Joustava	> 250
Puolijäykkä	50 - 250
Jäykkä	< 50

Asennusolosuhteiden vaikutus maanpaineeseen riippuu aina asennusmenetelmästä ja täyttömateriaalista. Kapeassa kaivannossa putkeen kohdistuva pystysuora maanpaine on paljon pienempi kuin leveässä kaivannossa tai penkereessä. Syynä tähän on kapean kaivannon seinämiin muodostuvat ylöspäin suuntautuvat kitkavoimat. Epätasaisesti tiivistetty täyttömateriaali tai kovalle alustalle asennettu putki saattaa aiheuttaa putkeen suuriakin maanpaine keskittymiä. (Jääskeläinen 1973a, s. 52.)

Putken peitesyvyiden kasvaessa pengerolosuhteissa putkeen kohdistuva täytemaakuorma kasvaa edellä esitetyn kaavan (4.4) mukaisesti. Tutkimusten perusteella pengerolosuhteissa peitesyvyiden ja täytemaankuorman välinen suhde on lineaarinen. Lineaarisuus pitää paikkansa ainakin suurissa putkikooissa 4-5m peitesyvyyteen asti. Ajoneuvokuormituksessa putkeen kohdistuva pystysuora maanpaine pienenee peitesyvyyden kasvaessa. Kaivanto-olosuhteissa täytemaakuorma saa kaavan (4.18) mukaisen raja-arvon, joka saavutetaan pienillä putkilla jo melkein normaaleilla peitesyvyyksillä. (Jääskeläinen 1973a, s. 53.)

$$P_v = \gamma_t \frac{B}{2} K_a \mu, \quad (4.18)$$

missä γ_t on täytemaan tilavuuspaino (kN/m³)
 B on kaivannon leveys (m)
 K_a on aktiivinen maanpaineekerroin (-)
 μ on kitkakerroin (-).

Sääolosuhteiden vaikutus maanpaineen jakautumiseen on vaikea ottaa laskennallisesti huomioon. Kokeellisesti on havaittu, että kesäolosuhteissa taipuisaan putkeen syntyy pienempiä muodonmuutoksia kuin talviolosuhteissa. Jos putkea ympäröivä täyttömateriaali on päässyt jäätymään asennustyön aikana, putkeen voi syntyä suuria muodonmuu-

toksia täyttömateriaalin sulaessa. Kun täyttömateriaali sulaa, sen kyky vastustaa vaakasuoraa muodonmuutosta heikkenee. Tällöin putkeen muodostuu lisämuodonmuutoksia ja maanpaineen jakautuminen muuttuu epäedulliseksi. Lämpötilaerosta aiheutuvalla putken kutistumalla on samanlainen vaikutus maanpaineeseen kuin jäätyneen täyttömateriaalin käytöstä. Putken kutistuessa ympäröivässä täyttömateriaalissa tapahtuu löyhlytymistä, jolloin putken sivuille kohdistuva maanpaine pienenee. Vastaavasti putken laajeneminen aiheuttaa maanpaineen kasvua. Jos putki pääsee laajenemaan samalla tavalla joka suuntaan, on maanpaineen lisäys tasainen koko putken poikkileikkauksella. (Jääskeläinen 1973a, s. 53-54.) Muovi- ja muovikomposiittiputket omaavat suuremman lämpötilalaajenemiskertoimen kuin teräs, joten näillä materiaaleilla maanpaineen lisäys saattaa olla merkittävä. Lämpötilasta aiheutuvaa maanpaineen lisäystä voidaan arvioida kaavalla (4.19) (Jääskeläinen 1973a, s. 54)

$$\Delta\sigma = \frac{2\sigma_L s}{D-s} \quad (4.19)$$

missä $\Delta\sigma$ on maanpaineen lisäys (MPa)
 σ_L on lämpöjännitys (MPa)
 s on putken seinämäpaksuus (m)
 D on putken ulkohalkaisija (m).

4.2 Numeerinen menetelmä

4.2.1 Yleistä

Numeerisiin menetelmiin perustuvien laskentaohjelmien käyttö on yleistynyt erilaisten geoteknisten ongelmien ratkaisemiseksi. Laskentaohjelmissa käytetyin numeerinen menetelmä on elementtimenetelmä (FEM), joka on osoittautunut tehokkaimmaksi laskenta-työkaluksi. Elementtimenetelmällä voidaan ratkaista likimääräisratkaisu mille tahansa matemaattiselle ongelmalle osittaisdifferentiaaliyhtälöiden avulla. Perusidea elementtimenetelmässä on ongelman geometrian jakaminen yksinkertaisiin elementteihin, joissa tarkasteltavat suureet approksimoidaan interpolaatiofunktioden avulla. Elementit yhdistetään toisiinsa niin sanottujen solmupisteiden avulla, missä elementtien interpolaatiofunktioden on toteutettava niille asetetut jatkuvuus-, tasapaino- ja reunaehdot. Elementtimenetelmällä saadun likimääräisratkaisun tarkkuus riippuu pääasiassa elementtien koosta ja siitä minkä asteisia interpolaatiofunktioita käytetään. (Reddy 2004, s. 5-6; Potts & Zdravkovic 1991, s. 23-39.)

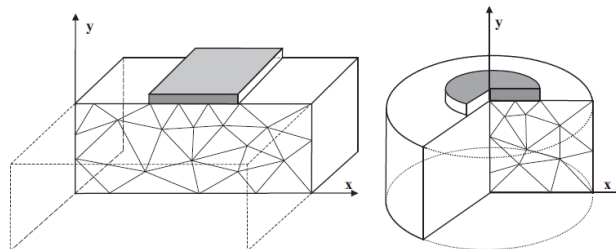
Geoteknisiin ongelmiin soveltuvia elementtimenetelmä -ohjelmia ovat muun muassa Adina, Abaqus, Comsol, Lusas ja Plaxis. Näistä Plaxis soveltuu parhaiten erilaisten geoteknisten ongelmien mallintamiseen monipuolisten materiaalmallien vuoksi.

Plaxis-ohjelman kehitys alkoi Delftin teknillisessä yliopistossa vuonna 1987. Alkuperäinen tarkoitus oli kehittää helppokäyttöinen kaksiulotteinen elementtiohjelma jokin penkereiden mallintamiseen pehmeikölle. Myöhemmin vuosina Plaxis laajentui kattamaan yleisemmät geotekniikan osa-alueet ja vuonna 1998 Plaxis yhtiö varsinaisesti perustettiin. Ensimmäinen Plaxis 2D ohjelma julkaistiin vuonna 1998. Plaxis 2D on kehitetty analysoimaan maaperän muodonmuutoksia, stabiliteettia ja pohjaveden virtausta. Plaxis-ohjelmasta on lisäksi julkaistu vuonna 2010 täysin kolmiulotteinen Plaxis 3D ohjelma. (Brinkgreve ym. 2011a, s. 3.) Kumpikin ohjelma on nykyisin laajasti käytetty

ja niiden toiminta ja tarkkuus on huolellisesti testattu tunnettujen analyttisten ratkaisujen avulla. Ohjelmien kehitykseen ovat osallistuneet monet yliopistot ja tutkimuskeskukset. (Brinkgreve ym. 2011b, s. 5.)

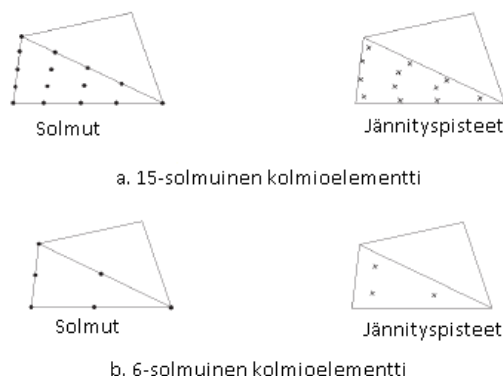
4.2.2 Malli ja elementit

Plaxis 2D:ssä on mahdollista valita tasogeometria tai pyörähdysymmetrinen laskentamalli. Tasogeometria mallia soveltuu käytettäväksi tilanteissa, joissa poikkileikkaus, jännitystilat ja kuormitus pysyvät pituusyksikköä kohden vakioina laskentatasoa vastaan kohtisuorassa suunnassa (z-suunnassa). Siirtymät ja venymät oletetaan tasogeometria mallissa z-suunnassa nolllaksi, mutta normaalijännitykset z-suunnassa otetaan täysin huomioon. Pyörähdysymmetristä mallia käytetään ympyränmuotoisille rakenteille, joilla on tasainen poikkileikkaus ja kuormitus pyörähdysakselin ympärillä. Pyörähdysymmetrisessä tilanteessa muodonmuutos ja jännitystilat oletetaan identtisiksi pyörähdysakselin ympärillä säteen suunnassa. (Brinkgreve ym. 2011c, s. 16-17.) Plaxis 2D:n laskentamallit on esitetty kuvassa 4.1.



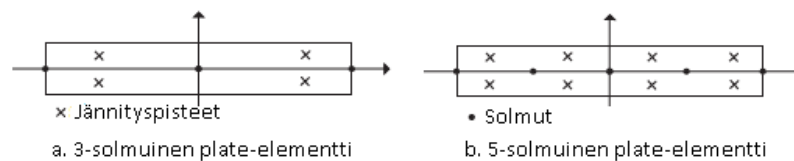
Kuva 4.4. Plaxis 2D:n laskentamallit: vasemmalla tasogeometria malli ja oikealla pyörähdysymmetrinen malli. (Brinkgreve ym. 2011c, s. 17.)

Plaxis 2D:ssä on mahdollista valita kaksi erilaista elementtiä: 6-solmuinen tai 15-solmuinen kolmioelementti. Näistä 15-solmuinen elementti on oletusarvoinen Plaxis 2D:ssä. 15-solmuisissa elementissä käytetään neljännen asteen interpolaatiofunktioita siirtymille ja se sisältää kaksitoista jännityspistettä (Gaussin pistettä), joissa jännitystilat lasketaan numeerisena integrointina. 6-solmuisissa elementissä vastaavasti käytetään toisen asteen interpolaatiofunktion käyttämisen siirtymille. 6-solmuinen elementti sisältää kolme jännityspistettä. 15-solmuisen elementin tarkkuus on huomattavasti parempi 6-solmuiseen verrattuna, mutta laskenta 15-solmuisella elementillä on paljon hitaampaa. (Brinkgreve ym. 2011c, s. 17-18.) Kuvassa 4.2 on esitetty Plaxis 2D:ssä käytettävät elementit.



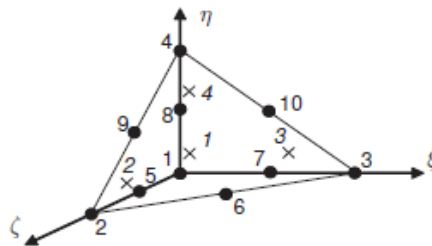
Kuva 4.5. Plaxis 2D:n elementit. (Brinkgreve ym. 2011c, s. 17.)

Seinien, laattojen, kuorien ja ankkureiden mallintamiseen Plaxis 2D:ssä käytetään plate-elementtiä. Plate-elementti perustuu Mindlin laattateoriaan, joka ottaa huomioon taipuman ja leikkausmuodonmuutoksen. Jos laskentamalli luodaan 6-solmuista maa-elementeistä niin Plaxis 2D käyttää 3-solmuista plate-elementtiä, jossa jännitystilä lasketaan neljässä jännityspisteessä. Vastaavasti 15-solmuisella maa elementtien kanssa Plaxis 2D käyttää 5-solmuista plate-elementtiä, jossa jännitykset lasketaan kahdeksalla jännityspisteellä. Jokaisella plate-elementin solmulla on kolme vapausastetta: kaksi siirtymä vapausastetta ja yks kiertymä vapausaste. Maan ja rakenteen välistä yhteistoimintaa Plaxis 2D:ssä mallinnetaan interface-elementin avulla. Plaxis 2D käyttää laskennallisista syistä interface-elementille virtuaalista paksuutta. Yleisesti interface-elementeille oletetaan kehittyvän hyvin vähän elastista muodonmuutosta, joten tämän vuoksi elementin paksuutena käytetään hieman nolasta poikkeavaa arvoa. (Brinkgreve ym. 2011c, s. 30-33.) Kuvassa 4.3 on esitetty Plaxis 2D:ssä käytettävät plate-elementit.



Kuva 4.6. Plate-elementit Plaxis 2D:ssä. (Brinkgreve ym. 2011c, s. 31.)

Plaxis 3D:ssä laskenta tapahtuu kolmiulotteisesti, joten siinä ei ole samanlaista laskentatapavaihtoehtoa kuin Plaxis 2D:ssä. Plaxis 3D:n maa-elementit ovat 10-solmuisia tetraedri elementtejä, joissa käytetään toisen asteen interpolaatiofunktioita ja laskennassa käytetään neljää jännityspistettä. Palkkien mallintamiseen Plaxis 3D:ssä käytetään 3-solmuista viiva elementtiä ja laatoille vastaavasti käytetään 6-solmuista plate-elementtiä. Maan ja rakenteen välistä yhteistoimintaa simuloidaan Plaxis 3D:ssä 12-solmuisella interface-elementillä. (Brinkgreve ym. 2012, s. 147.) Kuvassa 4.4 on esitetty Plaxis 3D:n 10-solmuinen maa elementti.



Kuva 4.7. Plaxis 3D:n 10-solmuinen maa-elementti. (Brinkgreve ym. 2012, s. 148.)

4.2.3 Materiaalimallit

Lineaarisesti elastinen materiaalmalli

Lineaarisesti elastinen malli (LE) perustuu Hooken lakiin. Hooken laki olettaa materiaalin isotrooppiseksi ja muodonmuutokset elastisiksi. Lineaarisesti elastisessa mallissa materiaalin venymät ovat riippuvia vallitsevasta jännityksestä. Lineaarinen elastinen malli sisältää kaksi parametria: kimmomoduulin E ja Poisson luvun ν . Mallissa jännitystasoa ei ole rajoitettu mitenkään, joten jännitykset materiaalissa voivat kasvaa loputtomiin. Lineaarista materiaalmallia käytettäessä on varmistuttava, etteivät jännitykset mallissa ylitä materiaalin lujuutta. Maan käyttäytyminen on epälineaarista ja plastista, joten lineaarinen elastinen malli ei kovin hyvin sovellu käytettäväksi maalle. Vaikka lineaarinen elastinen malli ei kovin hyvin sovellu käytettäväksi maalle, sitä voidaan

riittävällä tarkkuudella käyttää muun muassa jäykille rakenteita, ehjälle kalliolle ja asfaltille. (Brinkgreve ym. 2011d, s. 7-10.)

Mohr-Coulomb -materiaalimalli

Mohr-Coulombin (MC) malli on elasto-plastinen materiaalmalli, joka ei ota huomioon materiaalin myötälujenemista eikä kuormitushistoriaa. Mohr-Coulomb malli sisältää viisi parametria: kimmomoduulin E , Poisson luvun ν , kitkakulman ϕ , koheesion c ja dilataatiokulman ψ . Elasto-plastisessa mallissa materiaalia käyttäytyy täysin elastisesti ja isotrooppisesti murtoon asti, minkä jälkeen materiaali myötää jännityksen saavuttaessa murtotason. Materiaalin myötäessä muodonmuutokset kasvavat äärettömästi jännitysten pysyessä vakiona. Materiaalin kokonaismuodonmuutos koostuu elastisesta ja plastisesta muodonmuutoksesta. (Brinkgreve ym. 2011d, s. 7-10, s. 29-30.)

Hardening soil -materiaalimalli

Hardening soil -malli (HS) on kehittynyt materiaalmalli, jolla voi mallintaa sekä kitkamaita että koheesiomaita. Mohr-Coulombin mallista poiketen Hardening soil -malli huomio jäykkyyden riippumisen vallitsevasta jännitystasosta. Lisäksi Hardening soil malli poikkeaa Mohr-Coulombin mallista siinä että malli kuvaa aksiaalisen venymän ja deviatorisen jännityksen suhdetta hyperbolisena. Tämä tarkoittaa sitä, että deviatorisessa kuormituksessa maan jäykkyys pienenee ja maahan syntyy samanaikaisesti palautumattomia plastisia muodonmuutoksia. (Brinkgreve ym. 2011d, s. 7, s. 49-52.)

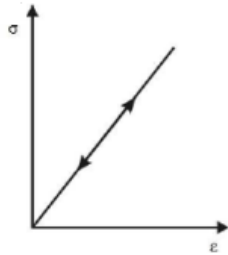
Hardening soil -malli kuvaa maan murtumista Mohr-Coulombin murtokriteerillä, joten murtotila kuvataan kitkakulman ϕ , koheesion c sekä dilataatiokulman ψ avulla. Maan jäykkyyden kuvaamiseen käytetään kolmea parametria: kolmiaksisiaalikokeen kuormitusvaiheesta määritetty sekanttimoduulia E_{50} , kolmiaksisiaalikokeen palautus- ja toistokuormitusvaiheen moduulia E_{ur} ja ödometrikokeen kuormitusvaiheesta määritettyä tangenttimoduulia E_{oed} . Hardening soil -mallin etuna täysin elasto-plastiseen malliin on simuloida maa isotrooppisena myötölujenevana materiaalina. Toisin kuin täysin elasto-plastisessa mallissa, myötöpinta laajenee hardening soil -mallissa plastisten muodonmuutoksen vaikutuksesta. Hardening soil -malli ottaa huomioon sekä leikkauksesta että kokoonpuristuvuudesta aiheutuvan myötölujenemisen. Leikkaus-myötölujenemista käytetään deviatorisesta pääjännityksestä aiheutuvien palautumattomien muodonmuutosten mallintamiseen. Puristus-myötölujittumista vastaavasti käytetään puristusjännityksestä aiheutuvien palautumattomia plastisten muodonmuutoksia mallintamiseen. (Brinkgreve ym. 2011d, s. 7, s. 49.) Hardening soil -mallissa on joitakin puutteita: malli ei ota huomioon dilataatiosta tai koheesiosidosten häviämisestä aiheutuvaa pehmenemistä. Malli ei myöskään ota huomioon jäykkyyden kasvamista hyvin pienillä muodonmuutoksen arvoilla ($< 10^{-5}$). (Brinkgreve ym. 2011d, s. 10.)

HSsmall -materiaalimalli

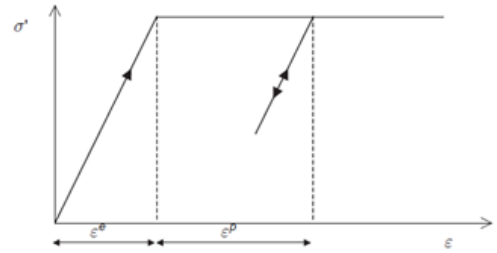
HSsmall -malli on muunnelma yläpuolella esitetystä Hardening soil -mallista. Hardening soil -mallista poiketen HSsmall -malli huomio pienten muodonmuutosten aiheuttaman jäykkyyden kasvamisen. HSsmall -malli ei kuitenkaan ota huomioon dilataatiosta tai koheesiosidosten häviämisestä aiheutuvaa pehmenemistä. Näin ollen HSsmall ei sovellu mallinnettavaksi syklisiin kuormituksiin, joissa maan pehmenemistä esiintyy. (Brinkgreve ym. 2011d, s. 10.) HSsmall -malli kuvaa maan murtumista ja jäykkyyttä samoilla parametreilla kuin Hardening soil -malli. Lisäksi HSsmall -mallissa maan jäykkyyden ja muodonmuutoksen riippuvuuden kuvaamiseen käytetään kahta paramet-

ria: pienten muodonmuutosten aiheuttama leikkausmoduulia G_0 ja liukumoduulia $\gamma_{0.7}$. HSsmall -mallin jännitys-muodonmuutoskäyttäytyminen palautus- ja toistokuormituksen aikana eroaa Hardening soil mallista siinä, että lineaarisen käyttäytymisen sijaan HSsmall malli kuvaa maa-aineksen käyttäytymisen epälineaarisenä. (Brinkgreve ym. 2011d, s. 8, s. 63.) Materiaalimallien jännitys-muodonmuutos-käyttäytymistä havainnollistetaan kuvassa 4.8.

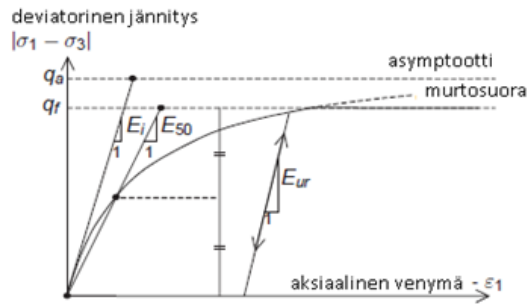
a) Lineaarisesti elastinen malli



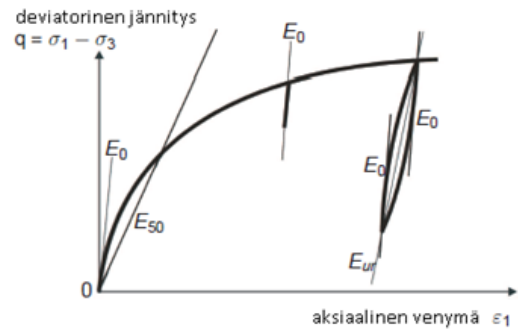
b) Mohr-Coulombin malli



c) Hardening soil -malli



d) HSsmall -malli



Kuva 4.8. Materiaalimallien jännitys-muodonmuutoskuvaajat. (Brinkgreve ym. 2011d, s. 30, 51, 69.)

5 Åkerfeltin koekohde

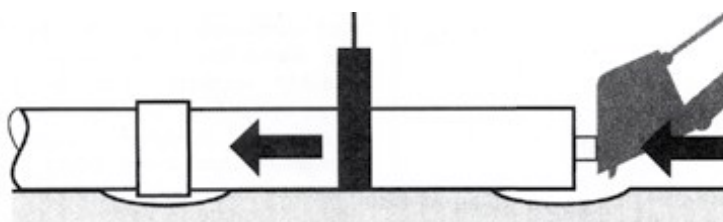
5.1 Instrumentointikohde

Koekohde sijaitsee Pohjankurussa tiellä 111 välillä Tenhola - Karjaa. Tie on komposiittiputken kohdalla yksikaistainen kumpaankin suuntaan ja tien kokonaisleveys on 7,5 m. Koekohteessa muovikomposiittiputki asennettiin vanhan 2 m halkaisijaltaan olevan ohutseinämäisen pyöreän teräsputken paikalle syksyllä 2013. Putki asennettiin 97 gon ($87,3^\circ$) suuntakulmassa tielinjaa nähden, jolloin putken suunta on pohjois-eteläsuuntainen. Koekohteen putkityyppi on pyöreä ja kohteessa käytettävä putki on HOBAS CC-GRP putkea, joka on valmistettu rotaatiovalulla. Koekohteen putki koostuu neljästä 6 metrin pituisesta putkesta, jotka on liitetty toisiinsa tehtaalla valmiiksi putkien päihin asennettujen muhviiliitoksien avulla. Komposiittiputken ulkohalkaisija on 2160 mm ja seinämävahvuus 47 mm. Nimellisrengasjäykkyys jokaisessa neljässä putkessa on $10\,000\text{ N/m}^2$. Kuvassa 5.1 on esitetty koekohde etelän suuntaan.



Kuva 5.1. Pohjankurun kohde pohjoisen suunnasta katsottuna.

Vanha ohutseinämäinen pyöreä teräsputki kaivettiin esille ja poistettiin penkereestä. Kaivannon luiskat luiskattiin 1:1,5 kaltevuuteen. Aiemmin rakennetun 950 mm paksuisen sora-arinan päälle asetettiin käyttöluokan N3 suodatinkangas, jonka päälle tiivistettiin 200 mm:n kerros raekooltaan 0-32 mm kalliomursketta. Ennen putkiosien asennusta arinan mursketta poistettiin putkien liitoskohdasta putkilinjan suoruden takaamiseksi ja asennuksen helpottamiseksi. Putket nostettiin nostoliinoilla kaivannon pohjalle. Liitettävien putkien ollessa vaaka-asennossa niiden päät suojattiin massiivipuulla ja työnnettiin muhviin kaivinkonetta apuna käyttäen. Riittävän työntösyvyyden tarkastamisen mahdollisti tehtaalla putken pään vaippaan merkitty viiva. Putket työnnettiin tähän viivaan asti. Kuvassa 5.2 on esitetty putkien keskinäinen liittäminen.



Kuva 5.2. Putken liitostapa. (Hobas.)

Putken ympärille tehtiin ympärystäyttö putkea vastaan raekooltaan 0-32 mm:n murskeella. Ympärystäyttö tehtiin 200–300 mm vaakasuorina kerroksina samanaikaisesti putken molemmille puolille. Muualle kuin putkea vastaan käytettiin ympärystäytteenä raekooltaan 0-150 mm kalliomursketta. Putken yläpuolella tiivistäminen tapahtui vasta kun peitesyvyys ylitti 300 mm. Putken ympärystäyttöä jatkettiin kunnes peitesyvyys oli 2266 mm tien kohdalla. Tien reunalta penger luiskattiin putken päitä kohdin 1:2 kaltevuudella. Tiivistäminen tehtiin tärylevyllä. Kuvassa 5.3 on esitetty putken ympärystäyttyötä.



Kuva 5.3. Putken ympärystäyttyötä.

Suunnitelmien mukaan ympärystäytön tiivistysaste täytyi vastata 95 %:n tiivistysasetta parannetulla Proctorkokeella. Tiehallinnon *Teräsputkisillat, Rakentamisen laatuvaatimukset* -ohjeen (Tiehallinto 2008) mukaan kuivairtotilavuuspainon tulee olla 95 % parannetulla Proctorkokeella määritetystä maksimi kuivatilavuuspainosta tai vaihtoehtoisesti levykuormituskokeen tulokset pitäisi täyttää ehdot (5.1) ja (5.2).

$$\frac{E_2}{E_1} \leq 2,2 \quad (5.1)$$

missä E_1 on ensimmäisen kantavuusmittauksen tulos [MPa]
 E_2 on samasta pisteestä mitattujen toistokuormitusten tulos [MPa]

$$E_2 \geq 145 \text{ MPa} \quad (5.2)$$

Riittävän tiiviysasteen toteamiseksi putken ympärystäytölle tehtiin kolmessa tasossa PANK-hyväksytyllä Loadman, kantavuuden mittaamenetelmällä. Mittaustasot olivat +9.40, +10.40 ja +12.80. Jokaisessa mittaustasossa tehtiin 6 mittausta. Taulukossa 5.1 on esitetty Loadmanin mittaustulokset.

Taulukko 5.1. Loadman mittaustulokset.

Loadman, kannettavan painopudotuslaitteen mittaustulokset						
	taso +9.40		Taso +10.40		Taso +12.80	
	E MPa	E_2/E_1	E MPa	E_2/E_1	E MPa	E_2/E_1
E_1	54	-	90	-	115	-
E_2	68	1,26	120	1,33	147	1,28
	69	1,28	133	1,48	161	1,40
	72	1,33	133	1,48	172	1,50
	72	1,33	135	1,50	175	1,52
	76	1,41	145	1,61	179	1,56
tulos	76	1,41	145	1,61	179	1,56

Tuloksista huomataan ympäristäytön toteuttavan ehdon (1) jokaisessa mittauspisteessä. Tasoilla +10,40 ja +12,80 ympäristäyttö toteuttaa myös ehdon (2). Näin ollen tierakenteen tiivistäminen on onnistunut halutulla tavalla ja tierakenne on saavuttanut riittävän kantavuuden.

Lopuksi tierakenne päällystettiin 60 mm:n paksuisella kantavalla asfalttiberonikerroksella AB 16/120 (B50/70). Kantavan asfalttiberonin päälle levitettiin lisäksi 50 mm:n paksuinen kulutuskerros ABK 32/160 (B50/70). Putkisilta viimeisteltiin asentamalla tierakenteeseen siltakaiteet.

5.2 Putken pysyvien muodonmuutosten mittaus

5.2.1 Mittauslaitteet

Liikenteen ja penkereen aiheuttamia pysyviä muodonmuutoksia mitattiin putkessa laserkeilaimella. Mittauksessa käytettiin Z+F IMAGER 5010 laserkeilainta. Z+F IMAGER 5010 laserkeilaimen mittaus perustuu kohteeseen lähetetyn ja kohteesta vastaanotetun signaalien vaihe-erojen mittaamiseen. Laserkeilain muodostaa kohteesta vaiheeron perusteella kolmiulotteisen pistepilven, jossa jokaisella yksittäisellä pisteellä on x-, y- ja z-koordinaatit. Laserkeilaimen kanssa käytetään erillisiä tähyksiä, joiden avulla kohteesta otettujen useiden mittauksien synnyttämät pistepilvet voidaan yhdistää toisiinsa katvealueiden minimoimiseksi. Tähyksien keskipisteiden sijainti voidaan määrittää takymetrillä, jolloin koko aineisto voidaan siirtää haluttuun koordinaattijärjestelmään. (Zoller+Fröhlich, 2014, s. 7-8.)

Laserkeilaimen peilijärjestelmä on pyörivä vinopeili, joka on asennettu keilaimeen 45° kulmassa pyörimisakselinsa suhteen. Lisäksi keilain pyörii ympäri oman pystyakselinsa suhteen. Laitteen keilauskulma on vaakasuunnassa 360°. Pystysuunnassa keilauskulma on 320° peilin alapuolisen rungon aiheuttaman katvealueen takia. Laserkeilaimen kulmatarkkuus pysty- ja vaakasuunnassa on 0,007°. Laserkeilaimen maksimi mittausnopeus on 1 016 027 pistettä sekunnissa. Laserkeilaimen lineaarinen virhe on alle 1 mm. (Zoller+Fröhlich 2014, s. 8-9.) Kuvassa 5.4 on esitetty mittauksessa käytetty laserkeilain.



Kuva 5.4. Laserkeilain Z+F imager 5010. (Zoller+Fröhlich.)

5.2.2 Mittausjärjestelyt ja mittauksen suoritus

Putkelle suoritettiin laserkeilaus kahteen kertaan. Ensimmäinen laserkeilaus suoritettiin 12.12.2013, joka oli kolme kuukautta putken asennuksen jälkeen. Toinen laserkeilaus suoritettiin talven jälkeen roudan sulattua 16.4.2014. Roudan sulamista seurattiin Finmeas Oy:n sivuilta Kirkkonummella sijaitsevan mittauslaitteen tallentamista lämpötilatiedoista. Kirkkonummen mittauspiste sijaitsi samankaltaisissa olosuhteissa noin 70 km päässä, joten sulaminen kohteessa arvioitiin etenevän lähes samalla nopeudella.

Putkessa virtaavan veden takia laserkeilaimen alustana ei voitu käyttää alumiinista kolmijalkaa. Veden virtausnopeudeksi putkessa mitattiin 1,2 m/s. Tämän vuoksi laserkeilaimelle rakennettiin vanerilevystä alusta siten, että vanerilevyn reunat tukeutuivat putken seinämiin 400 mm:n korkeudelle putken pohjasta. Tällä tavoin saatiin laserkeilaimelle tukeva alusta vedenpinnan yläpuolelle. Putken etelä- ja pohjoispäättyihin asennettiin putken kehälle kaksi ympyrän muotoista tähyistä. Tähysten keskipisteet mitattiin takymetrillä ja putken eteläpäätyyn muodostettiin takymetrien avulla paikallinen koordinaatisto. Paikallisen koordinaatiston avulla kahden eri mittauskertojen mittautuloksia voitiin verrata toisiinsa.

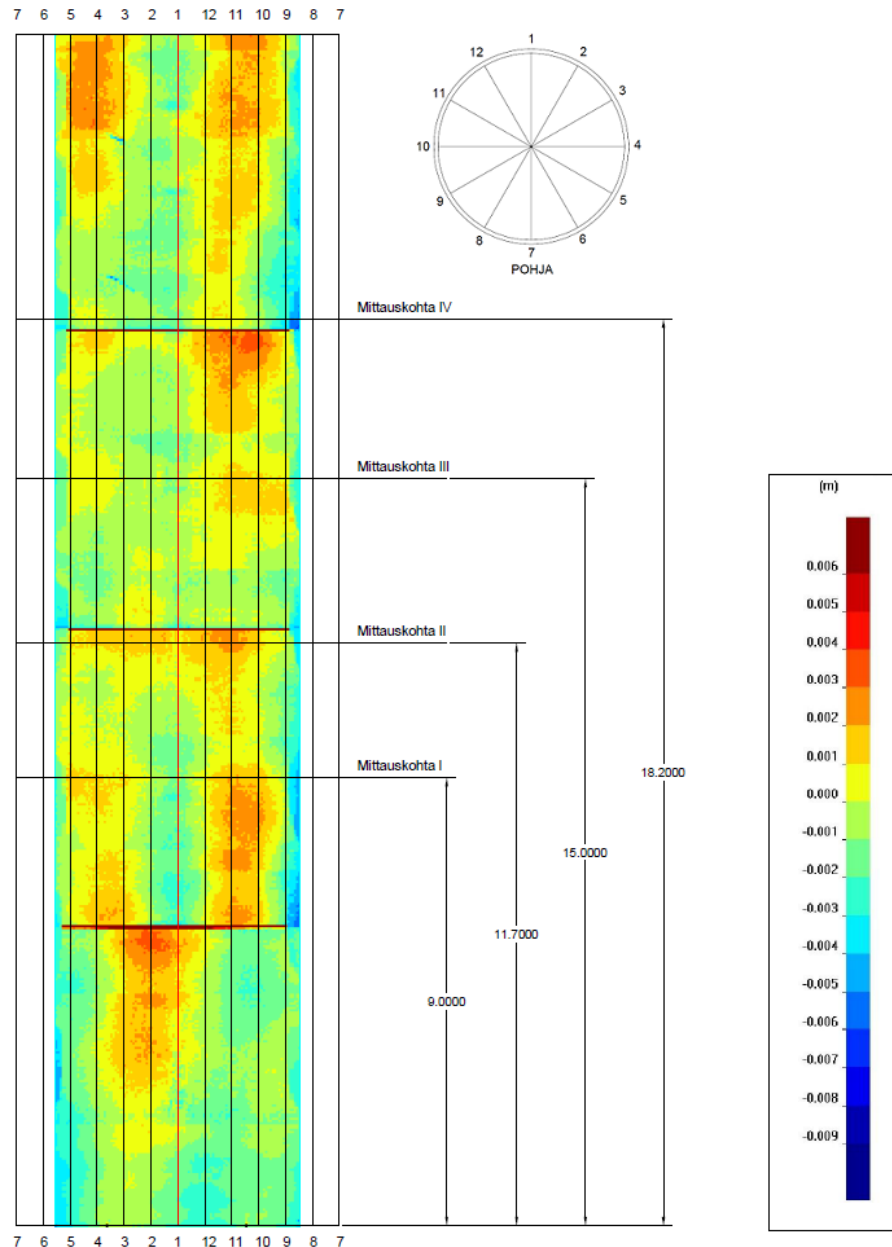
Ennen mittauksen aloittamista putken pintaan tiivistynyt vesi kuivattiin pyyhkeellä. Putken pituudesta johtuen putki laserkeilattiin yhdeksässä osassa. Laserkeilaus aloitettiin putken pohjoispäästä ja laserkeilainta siirrettiin kolmen metrin välein. Tällä tavoin saatiin kuvattua koko putki kaikkine liitoksineen. Kuvassa 5.5 on esitetty laserkeilaimen mittausjärjestelyt. Kuvassa 5.5 näkyvät tähyksien lätkät on käännetty toisin päin niiden keskipisteen sijainnin määrittämisen ajaksi.



Kuva 5.5. Laserkeilaimen mittausjärjestelyt.

5.2.3 Mittaustulokset

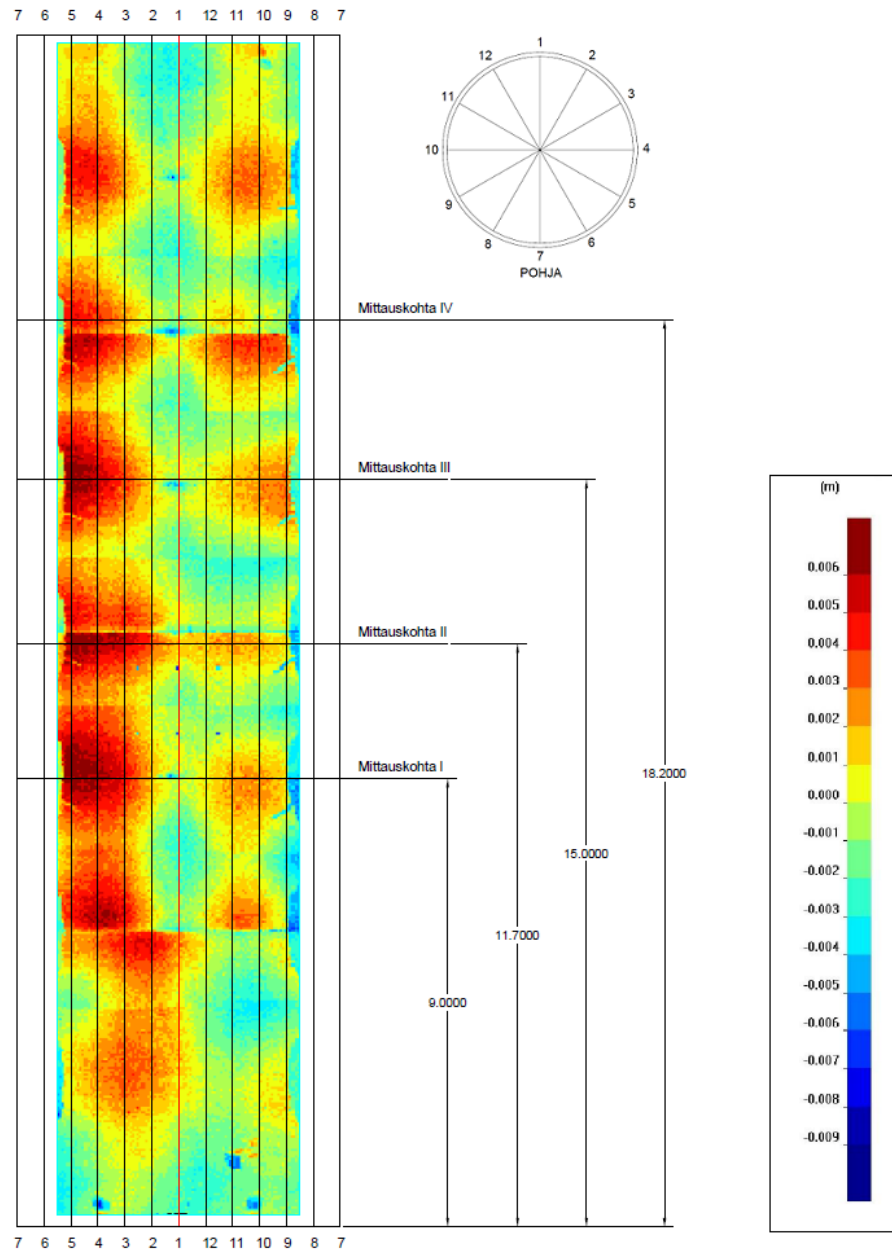
Putken jokaiselle kuuden metrin pituiselle putken osalle määritettiin omat keskilinjat keilausaineistosta. Kullekin putken osalle laskettiin sisäsäteen keskiarvo noin kuuden miljoonan pisteen otannasta. Mittaustulosten perusteella teoreettisten putken osat mallinnettiin käyttäen määriteltyä keskilinjaa ja kaikista putken osista laskettua sisäsäteen keskiarvoa 1,0325 m, joka vastasi teoreettista putken sisähalkaisijaa. Joulukuussa ja huhtikuussa suoritettujen laserkeilausmittausten pistepilviä vertailtiin tähän tasasäteiseen lieriöön. Laserkeilausten 3D värikarttatuloksista muodostettiin avattu tasomainen värikarttapoikkeamakuva tulosten tulkitsemisen helpottamiseksi. Kuvassa 5.6 on esitetty 12.12.2013 suoritettun laserkeilauksen mittaustulokset ja kuvassa 5.7 on vastaavasti esitetty 16.4.2014 suoritettun laserkeilauksen mittaustulokset. Kuvassa 5.8 on verrattu 12.12.2013 ja 16.4.2014 laserkeilauskertojen pistepilvien tuloksien erotuksia toisiinsa. Lisäksi taulukoihin 5.2 ja 5.3 on kerätty kummankin laserkeilauksen pistepilvistä neljästä eri kohdasta sisähalkaisijan arvoja. Tarkastelu kohdat sijaitsevat putken pohjoispään suulta mitattuna 9 m, 11,7 m, 15 m ja 18,2 m kohdissa.



Kuva 5.6. 12.12.2013 laserkeilauksen mittaustulokset.

Taulukko 5.2. 12.12.2013 laserkeilauksen sisähalkaisijan arvoja eri mittauskohdissa.

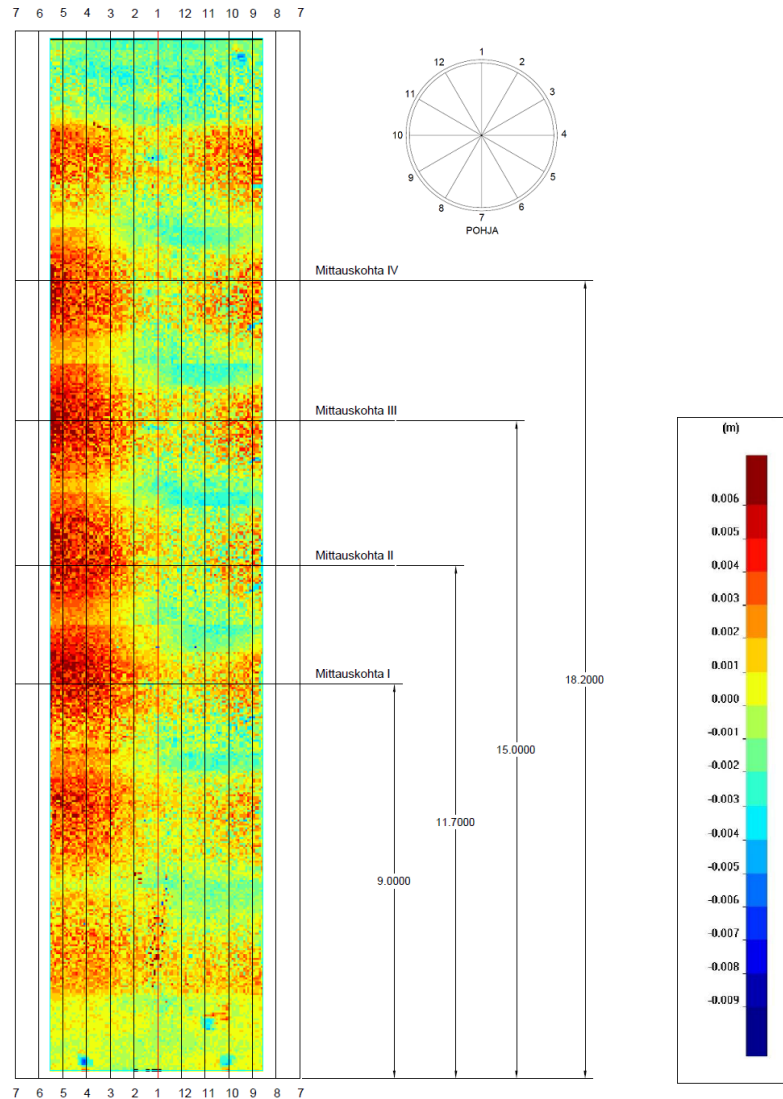
Laserkeilaus 12.12.2013				
Poikkileikkaus	Mittauskohta 1	Mittauskohta 2	Mittauskohta 3	Mittauskohta 4
	mm	mm	mm	mm
1-7	-	-	-	-
2-8	-	-	-	-
3-9	2066	2066	2070	2066
4-10	2064	2069	2069	2072
5-11	2060	2067	2067	2071
6-12	-	-	-	-



Kuva 5.7. 16.4.2014 laserkeilauksen mittaustulokset.

Taulukko 5.3. 16.4.2014 laserkeilauksen sisähalkaisijan arvoja eri mittauskohdissa.

Laserkeilaus 16.4.2014				
Poikkileikkaus	Mittauskohta 1	Mittauskohta 2	Mittauskohta 3	Mittauskohta 4
	mm	mm	mm	mm
1-7	-	-	-	-
2-8	-	-	-	-
3-9	2066	2072	2071	2070
4-10	2069	2072	2073	2073
5-11	2071	2072	2074	2073
6-12	-	-	-	-



Kuva 5.8. 12.12.2013 ja 16.4.2014 mittaustulosten erotukset.

Kuvien 5.7 ja 5.8 sekä taulukoiden 5.2 ja 5.3 mukaan putken halkaisija olisi kasvanut sivulle päin. Kuvissa 5.7 ja 5.8 näkyy 3 metrin välein muodonmuutosalueita, jotka sijaitsevat juuri niillä paikoilla, joihin laserkeilaus siirrettiin skannauksen ajaksi. Tämä viittaa laserkeilauksessa tapahtuneeseen mittausvirheeseen. Koska ei voitu olla varmoja, ovatko 12.12.2013 ja 16.4.2014 tulokset paikkaansa pitäviä, niin putken sisähalkaisijat mitattiin mittauskohdissa 1-4 vielä mittanauhan, mittakellon sekä Wurth WDM 100 laseretäisyysmittarin avulla. Mittakello liitettiin kahden metrin terästangon päähän ja mittakellon nolla mitaksi valittiin 2060 mm. Laseretäisyysmittarin tarkkuus tarkistettiin laboratorio-olosuhteissa kahden teräslevyn välissä mittanauhan avulla. Taulukoissa 5.4-5.6 on esitetty mittanauhalla, laseretäisyysmittarilla ja mittakellolla mitatut putken sisähalkaisijan arvot sekä taulukoissa 5.7-5.12 on vertailtu mittanauhalla, laseretäisyysmittarilla ja mittakellolla saatuja tuloksia 12.12.2013 ja 16.4.2014 laserkeilauksien tuloksiin. Taulukoissa 5.7-5.12 miinusmerkki tarkoittaa laserkeilaustuloksien olevan suurempia.

Taulukko 5.4. Mittanauhalla mitatut putken halkaisijat.

Mittanauha				
Poikkileikkaus	Mittauskohta 1	Mittauskohta 2	Mittauskohta 3	Mittauskohta 4
	mm	mm	mm	mm
1-7	2051	2056	2053	2052
2-8	2055	2060	2057	2053
3-9	2060	2060	2057	2055
4-10	2060	2060	2059	2057
5-11	2061	2062	2060	2058
6-12	2055	2058	2057	2057

Taulukko 5.5. Laseretäisyysmittarilla mitatut putken halkaisijat.

Laseretäisyysmittari Wurth WDM 100				
Poikkileikkaus	Mittauskohta 1	Mittauskohta 2	Mittauskohta 3	Mittauskohta 4
	mm	mm	mm	mm
1-7	2053	2060	2061	2060
2-8	2058	2061	2062	2062
3-9	2061	2062	2062	2063
4-10	2062	2063	2062	2059
5-11	2063	2064	2062	2052
6-12	2058	2061	2058	2060

Taulukko 5.6. Mittakellolla mitatut putken halkaisijat.

Mittakello				
Poikkileikkaus	Mittauskohta 1	Mittauskohta 2	Mittauskohta 3	Mittauskohta 4
	mm	mm	mm	mm
1-7	2050,95	2056,26	2057,12	2054,15
2-8	2056,05	2059,7	2057,962	2054,5
3-9	2060,78	2061,15	2059,32	2055,75
4-10	2061,06	2061,72	2060,03	2057,945
5-11	2061,95	2062,9	2060,75	2059,96
6-12	2055,15	2058,7	2056,16	2058,25

Taulukko 5.7. Mittanauhan ja 12.12.2013 laserkeilauksen vertailu.

Mittanauha vs. laserkeilaus 12.12.2013				
Poikkileikkaus	Mittauskohta 1	Mittauskohta 2	Mittauskohta 3	Mittauskohta 4
	mm	mm	mm	mm
3-9	-6	-6	-13	-11
4-10	-4	-9	-10	-15
5-11	1	-5	-7	-13

Taulukko 5.8. Mittakellon ja 12.12.2013 laserkeilauksen vertailu.

Mittakello vs. laserkeilaus 12.12.2013				
Poikkileikkaus	Mittauskohta 1	Mittauskohta 2	Mittauskohta 3	Mittauskohta 4
	mm	mm	mm	mm
3-9	-5,22	-4,85	-10,68	-10,25
4-10	-2,94	-7,28	-8,97	-14,055
5-11	1,95	-4,1	-6,25	-11,04

Taulukko 5.9. Laseretäisyysmittarin ja 12.12.2013 laserkeilauksen vertailu.

Laseretäisyysmittari Wurth WDM 100 vs. laserkeilaus 12.12.2013				
Poikkileikkaus	Mittauskohta 1	Mittauskohta 2	Mittauskohta 3	Mittauskohta 4
	mm	mm	mm	mm
3-9	-5	-4	-8	-3
4-10	-2	-6	-7	-13
5-11	3	-3	-5	-19

Taulukko 5.10. Mittanauhan ja 16.4.2014 laserkeilauksen vertailu.

Mittanauha vs. laserkeilaus 16.4.2014				
Poikkileikkaus	Mittauskohta 1	Mittauskohta 2	Mittauskohta 3	Mittauskohta 4
	mm	mm	mm	mm
3-9	-6	-12	-14	-15
4-10	-9	-12	-14	-16
5-11	-10	-10	-14	-15

Taulukko 5.11. Mittakellon ja 16.4.2014 laserkeilauksen vertailu.

Mittakello vs. laserkeilaus 16.4.2014				
Poikkileikkaus	Mittauskohta 1	Mittauskohta 2	Mittauskohta 3	Mittauskohta 4
	mm	mm	mm	mm
3-9	-5,22	-10,85	-11,68	-14,25
4-10	-7,94	-10,28	-12,97	-15,055
5-11	-9,05	-9,1	-13,25	-13,04

Taulukko 5.12. Laseretäisyysmittarin ja 16.4.2014 Laserkeilauksen vertailu.

Laseretäisyysmittari Wurth WDM 100 vs. laserkeilaus 16.4.2014				
Poikkileikkaus	Mittauskohta 1	Mittauskohta 2	Mittauskohta 3	Mittauskohta 4
	mm	mm	mm	mm
3-9	-5	-10	-9	-7
4-10	-7	-9	-11	-14
5-11	-8	-8	-12	-21

Taulukoiden 5.4 ja 5.6 perusteella mittanauhalla ja mittakellolla saadaan noin 1 mm:n tarkkuudella samoja tuloksia lukuun ottamatta muutamaa poikkileikkausta. Laseretäisyysmittari antaa poikkileikkauksesta riippuen 1-9 mm suurempia arvoja kuin mittanauha tai mittakello. Taulukoista 5.7-5.12 nähdään laserkeilaimen antavan huomattavasti suurempia halkaisijan arvoja kuin mittanauhalla, laseretäisyysmittarilla tai mittakellolla mitattuna. Tulosten perusteella laserkeilaimella tai laseretäisyysmittarilla ei päästä tä-

män kaltaisessa kohteessa tarpeeksi tarkkaan mittaustarkkuuteen. Lisäksi taulukoiden 5.4-5.12 tulokset tukevat aiemmin esitettyä olettamusta, että 16.4.2014 suoritettussa laserkeilauksessa oli tapahtunut mittausvirhe.

5.2.4 Laserkeilauksen virhelähteitä

Mittausvirheitä laserkeilauksen mittauksissa aiheutuu muun muassa (Järvinen 2007, s. 18-20)

- systemaattisesta virheestä
- keilattavan kohteen ominaisuuksista ja ympäristötekijöistä
- laserkeilaimen lähettämän säteen hajoamiskulmasta.

Systemaattista virhettä aiheutuu esimerkiksi kalibroimattoman laserkeilaimen käytöstä tai mittalaitteen vääränlaisesta käsittelystä. Systemaattista virhettä on kuitenkin mahdollista korjata laskemalla, jos virhelähteen luonne tunnetaan. Mittaustulosten käsittely suoritetaan yleensä jollakin fysikaalisella mallilla, joten virheet voidaan ottaa huomioon käytettävän mallin yhteydessä. (Järvinen 2007, s. 18-19.)

Mittaustulosten luotettavuuteen vaikuttaa keilattavan kohteen ominaisuuksista muoto, väri ja pintamateriaalin ominaisuudet eli kuinka paljon lasersäteen intensiteetti muuttuu kohteesta takaisin heijastuessa. Kiiltävät ja erittäin tummat pinnat sekä läpikuultavat materiaalit aiheuttavat suurta virhettä mittaustuloksiin. Kiiltävät ja erittäin tummat pinnat joko peilaavat palauttaen säteen suurella teholla tai eivät palauta lasersädettä lainkaan takaisin. Läpikuultavat materiaalit taas taittavat sädettä, jolloin keilattava kohde antaa etäisyydeltään ja kulmaltaan virheellisiä tuloksia. (Järvinen 2007, s. 20; Suominen 2007, s. 20.)

Laserkeilaimet perustuvat valoaaltojen käyttöön, joten laserkeilaimet ovat herkkiä mittaustilaympäristön optisille ominaisuuksille ja niiden muutoksille. Ilman optiset ominaisuudet muuttuvat huomattavasti esimerkiksi kosteissa olosuhteissa. Tämä vaikuttaa laserkeilaimen lähettämään säteen kulkuun väliaineessa, mikä vaikuttaa vuorostaan kohteesta saataviin mittaustuloksiin. (Järvinen 2007, s. 20.) Mittaustuloksiin vaikuttaa kosteuden lisäksi mittausalueella oleva pöly, savu tai lumi (Suominen 2007, s. 20).

Laserkeilaimen lähettämän säteen hajoamiskulmalla tarkoitetaan avaruuskulmaa, jonka sisällä lasersäteen energia etenee ja vaimenee tiettyyn murto-osaan huippuintensiteetistä. Mittaustarkkuuteen vaikuttaa lasersäteen energian leviämisen suuruus, sillä mitä leveämpi säteen avaruuskulma on, sitä kauempaa säteen keskikohdasta kaikuja rekisteröidään. Laserkeilauksessa kaiut rekisteröidään säteen nimelliskulman suuntaan, mikä aiheuttaa mittauserävarmuutta varsinkin kun säteen suunnassa on voimakasta etäisyysvaihtelua. (Järvinen 2007, s. 19.)

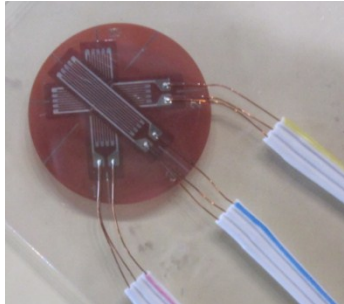
5.3 Hetkellisten muodonmuutosten mittaus

5.3.1 Mittauslaitteet

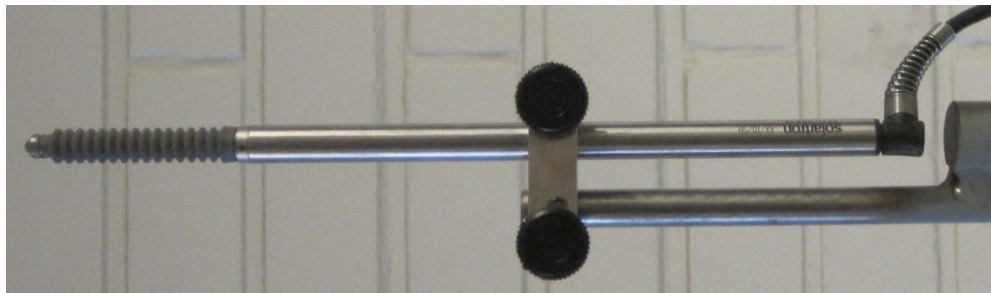
Venymäliuskat ja siirtymäanturit

Kuorma-autojen aiheuttamia hetkellisiä muodonmuutoksia mitattiin venymäliuskojen ja induktiivisilla siirtymäantureiden avulla. Venymäliuskoina käytettiin Kyowan valmistamia KFG-10-120-D17-11L1M3S kolmiakselisia rosettiliuskoja, joiden resistanssi oli

120 Ω . Rosettiliuskat koostuivat kolmesta 10 mm:n pituisista liuskoista, jotka on asetettu 0°, 45° ja 90° kulmissa halkaisijaltaan 21 mm:n liuskapohjalle. (Kyowa 2014.) Liitteessä 2 on esitetty tarkemmat tiedot rosettiliuskoista. Induktiivisina siirtymäantureina käytettiin kalibroituja Solartronin valmistamia SH /10/AX antureita, joiden mittausalue oli ± 10 mm (Solartron, 2014). Mittauksissa käytettiin 6 kpl rosettiliuskoja ja 6 kpl siirtymäantureita. Kuvassa 5.9 on esitetty mittauksissa käytetty rosettivenymäliuska ja kuvassa 5.10 on esitetty induktiivinen siirtymäanturi.



Kuva 5.9. Mittauksissa käytetty venymäliuska.



Kuva 5.10. Mittauksissa käytetty siirtymäanturi.

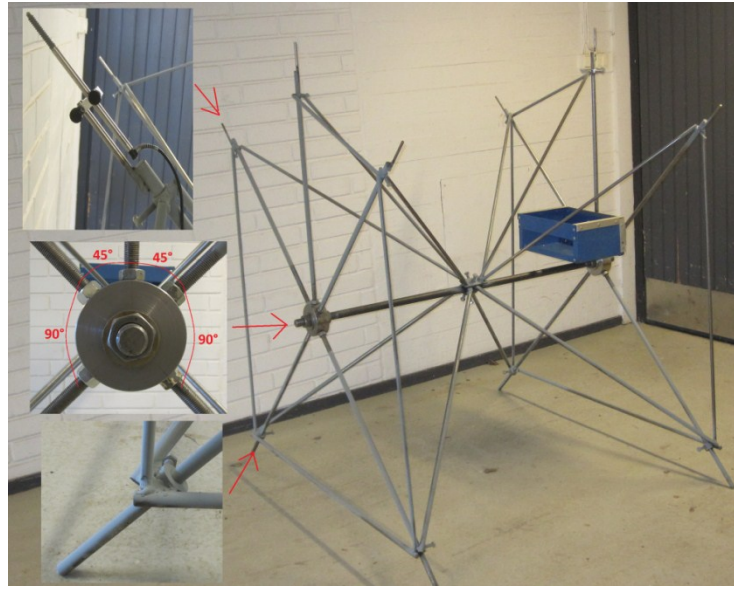
Mittauskokoonpano

Siirtymäanturit kiinnitettiin HBM QuantumX MX840A tiedonkeruulaitteeseen. Tekniseltä toiminnaltaan tiedonkeruulaite on kahdeksan kanavainen 24 bitin A/D muunnin, jonka suurin mahdollinen mittaussnopeus on 19200 mittausta sekunnissa. (HBM 2014a.) Venymäliuskat kiinnitettiin vastaavasti kahteen 10-kanavaiseen HBM CANHEAD tiedonkeruulaitteisiin, joiden suurin mahdollinen mittaussnopeus on 300 mittausta sekunnissa (HBM 2014b). Lisäksi mittauksissa käytettiin HBM MGCPlus vahvistinta (HBM 2014c), jonka avulla CANHEAD tiedonkeruulaitteet liitettiin kannettavaan tietokoneeseen. Tietokoneessa käytettiin HBM laitevalmistajan tietokoneohjelmaa CatmanAP versiota 3.4.2 (HBM 2014d). Mittauksissa käytettiin venymäliuskoille ja siirtymäantureille mittaussnopeutena 300 mittausta sekunnissa.

Mittauskehikko

Siirtymäantureille rakennettiin mittauskehikko 12 mm:n ja 24 mm:n terästangoista ja kahdesta 110 mm:n halkaisijaltaan olevista teräskappaleista. Mittauksissa haluttiin saada selville putken laen muodonmuutos kuorma-auton toisen puolen renkaiden alla ja kuorma-auton akselin keskellä sekä lähestyvän kuorma-auton aiheuttamat muodonmuutokset putkessa. Näin ollen kumpaankin teräskappaleeseen kiinnitettiin siirtymäantureille kolme 12 mm:n kiinnitystankoa niin, että tankojen välinen kulma oli 45 astetta. Tankojen kylkeen hitsattiin 8 mm:n tangot, joiden avulla siirtymäanturit saatiin kiinnitettynä kiinnitystankojen suuntaisesti. Lisäksi kumpaankin teräskappaleeseen kiinnitettiin kak-

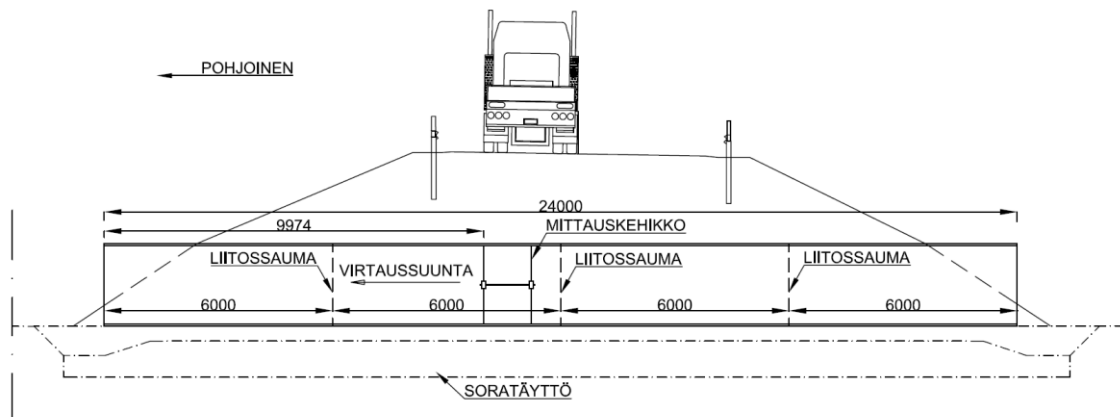
si terästankoa, jotka toimivat mittauskehikon jalkoina. Jalkojen kärjet sorvattiin 3 mm:n kokoiseksi parantamaan mittauskehikon pysyvyyttä putken pinnalla. Terästankojen kiinnitys teräskappaleisiin tehtiin kierteiden avulla, joiden avulla terästankojen pituutta pystyttiin muuttamaan. Terästangot lukittiin teräskappaleisiin muttereilla. Teräskappaleet yhdistettiin 24 mm:n tangolla, joka samalla antoi kehiolle lisää painoa. Mittauskehikkoon tehtiin lisäksi jäykistysristikot tukemaan siirtymäantureiden kiinnitystankoja ja estämään veden virtauksen aiheuttaman värähtelyn mittauskehikossa. Kuvassa 5.11 on esitetty siirtymäantureille rakennettu mittauskehikko.



Kuva 5.11. Siirtymäantureiden mittauskehikko.

5.3.2 Mittausjärjestelyt

Mittauskehikko sijoitettiin putken yliajavien kuorma-autojen telikuormien alapuolelle. Kuorma-autojen ajolinjojen kohdistamisen helpottamiseksi asfaltin pintaan merkattiin merkkauksmaalilla viiva, jonka päälle haluttiin kuorma-autojen renkaiden osuvan. Merkistä mitattiin matka putken päähän ja mitatun matkan avulla kehikko sijoitettiin putken sisälle. Mittauskehikon sijoitettiin putken 9974 mm:n päähän putken pohjoispäädyn suusta. Kuvassa 5.12 on esitetty mittauskehikon sijainti putkessa.



Kuva 5.12. Mittauskehikon sijainti putkessa.

Jokaisen siirtymäanturin viereen liimattiin rosettivenymäliuska. Rosettivenymäliuskat liimattiin putkeen niin, että rosetin yksi liuska oli putken säteen suunnassa, toinen putken pituussuunnassa ja kolmas näiden kahden liuskan välissä 45 asteen kulmassa. Liimattujen venymäliuskojen päälle siveltiin silikonipohjaista massaa. Massan kuivuttua venymäliuskojen päälle asennettiin vielä ohut alumiinipaperilla päällystetty massalevy. Näiden tehtävä oli suojata venymäliuskaa kosteudelta ja säteilyltä sekä suojata venymäliuskoja mekaanisilta rasituksilta.

Putken sisälle vedettävien johtojen vähentämiseksi siirtymäantureiden ja venymäliuskojen tiedonkeruulaitteet jouduttiin sijoittamaan putken sisälle. Tiedonkeruulaitteet sijoitettiin mittauskehikkoon kiinnitettyihin tähän tarkoitukseen tehtyihin peltilaatikoihin. Putken sisälle vedettiin siirtymäantureiden tiedonkeruulaitteen verkkovirtajohto, venymäliuskojen tiedonkeruulaitteen CAN-väylä-kaapeli ja siirtymäantureiden tiedonkeruulaitteeseen ethernet-kaapeli. Johdot kiinnitettiin putken päihin kiinnitettyyn teräsvaijeriin johdinsiteillä. Tällä tavoin estettiin johtojen roikkuminen vedessä. Mittauslaitteiden sähkövirta tuotettiin aggregaatin avulla. Kuvassa 5.13 on esitetty mittausjärjestelyt putken sisällä



Kuva 5.13. Mittausjärjestelyt putken sisällä.

5.3.3 Mittauksen suoritus

Mittaukset suoritettiin 9.4.2014 kolmiakselisella ja neliakselisella kuorma-autolla. Kolmiakselisen kuorma-auton akselivälit olivat 3600 mm ja 1350 mm. Neliakselisen kuorma-auton akselivälit olivat 3350 mm, 1400 mm ja 1300 mm. Kuorma-autojen rengaspaineiksi mitattiin noin 850 kPa. Taulukossa 5.10 on esitetty kuorma-autojen raidevälit mitattuna renkaiden kulutuspintojen ulkoreunasta.

Taulukko 5.13. Kuorma-autojen raidevälit.

Kuorma-autojen raidevälit	Etuakseli [mm]	Toinen akseli [mm]	Kolmas akseli [mm]	Neljäs akseli [mm]
3-akselinen	2320	2430	2430	-
4-akselinen	2300	2290	2420	2420

Kuorma-autot kuormattiin soralla. Koska mittauspäivälle ei saatu akselipainovaakaa, niin kuorma-autojen kokonaispainot laskettiin lisätyn sorakuorman mukaan. Mittauspäivän jälkeen kuorma-autojen akselimassat mitattiin samalla kokonaispainolla, joka oli mittauspäivän laskettu. Tästä syystä kuorma-autojen mitatut akselimassat ovat suuntaa-antavia. Kuorma-autojen akselimassat mitattiin DINI ARGEO WWSD10T laitteella ja kuorma-autojen jokainen akseli mitattiin kolmeen kertaan. Taulukoissa 5.11 ja 5.12 on esitetty kuorma-autojen akselimassat ja kokonaismassat.

Taulukko 5.14. Kolmiakselisen kuorma-auton akselimassat.

3-akselinen kuorma-auto / mittauskerta	Yksittäispyörät	Paripyörät	Paripyörät		
	1-akseli [kg]	2-akseli [kg]	3-akseli [kg]	4-akseli [kg]	Yhteensä [kg]
1	8250	10700	8020	-	26970
2	8300	11540	7920	-	27760
3	8390	11110	7960	-	27460
Keskiarvo	8313	11117	7967	-	27397
Keskihajonta	58	343	41	-	326
Variaatiokerroin	0,70 %	3,09 %	0,52 %	-	1,19 %

Taulukko 5.15. Neliakselisen kuorma-auton akselimassat.

4-akselinen kuorma-auto / mittauskerta	Yksittäispyörät	Yksittäispyörät	Paripyörät	Paripyörät	
	1-akseli [kg]	2-akseli [kg]	3-akseli [kg]	4-akseli [kg]	Yhteensä [kg]
1	7960	7310	10480	8690	34440
2	7950	7480	10550	8710	34690
3	8050	7390	10500	8660	34600
keskiarvo	7987	7393	10510	8687	34577
Keskihajonta	45	69	29	21	103
Variaatiokerroin	0,56 %	0,94 %	0,28 %	0,24 %	0,30 %

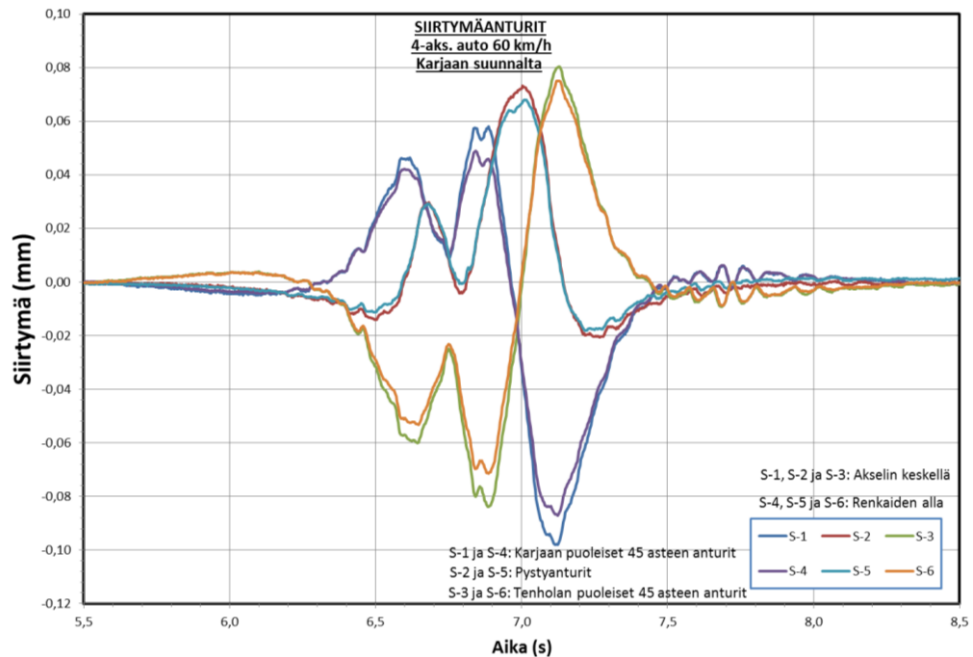
Kuorma-autoja ajettiin 20 km/h, 40 km/h, 60 km/h ja 80 km/h nopeudella putken yli niin, että kuorma-auton rengas kulki tiehen merkityn merkkiviivan päältä. Lisäksi kuorma-autot pysäytettiin putken päälle. Kuorma-autoja pidettiin putken päällä pysähtyneenä noin 20 sekunnin ajan. Putkea kuormitettiin jokaisella kuormitusnopeudella kolme kertaa ja putken kuormitusuuntaa vaihdettiin jokaisen yliajon jälkeen. Mittauksen ajaksi muu liikenne pysäytettiin liikenneturvallisuuden takaamiseksi. Liikenteen pysäytyksellä minimoitiin siirtymäantureihin ja venymäliuskoihin aiheutuvat häiriöt mittauksen aikana. Kummallekin ajokaistalle sijoitettiin yksi henkilö pysäyttämään liikenne mittauksen ajaksi. Kuormituksen aikana ilman lämpötilaksi mitattiin +5,8 astetta. Tien lämpötilaa ei kuormituksen aikana mitattu.

5.3.4 Mittaustulokset

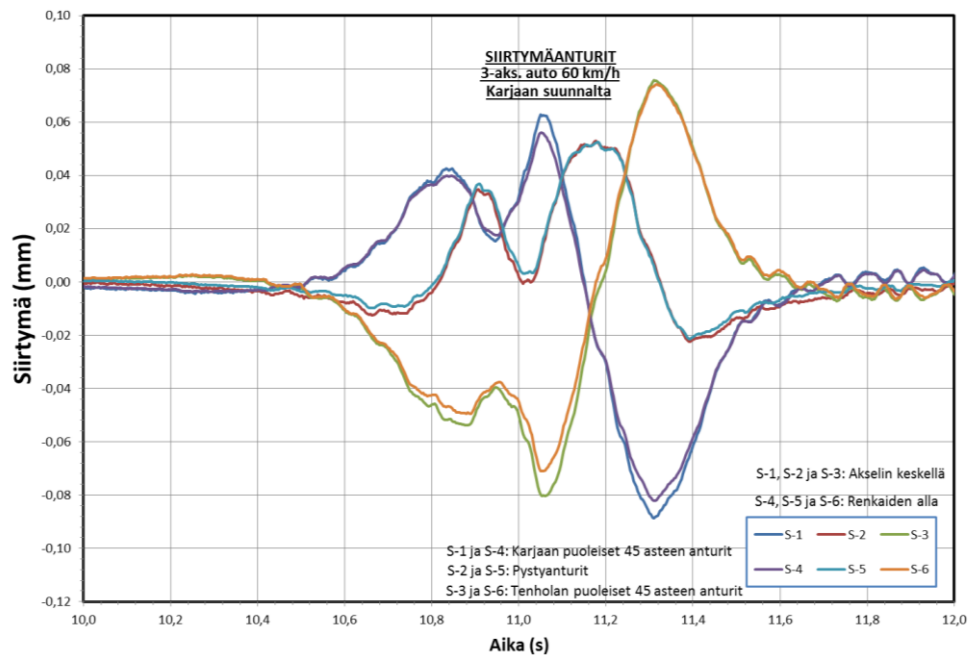
Siirtymäanturit

Kuvassa 5.14 on esitetty neliakselisen kuorma-auton aiheuttamat siirtymät antureissa ajan suhteen 60 km/h nopeudella. Kuvassa 5.15 on vastaavasti esitetty kolmiakselisen kuorma-auton aiheuttamat siirtymät antureissa. Kuvissa 5.14 ja 5.15 positiivinen siirty-

män arvo tarkoittaa putken halkaisijan pienenemistä. Kuvista 5.14 ja 5.15 nähdään kuorma-autojen aiheuttaneen jokaiseen anturiin kolme siirtymäpiikkiä. Ensimmäinen piikki on lähestyvän kuorma-auton etuakselin aiheuttama, toinen piikki on putkea lähestyvien taka-akselien aiheuttama ja kolmas piikki on poistuvien taka-akselien aiheuttama. Kuvissa 5.14 ja 5.15 ei näy poistuvan etuakselien aiheuttamaa piikkiä, koska kuorma-auton taka-akselit kuormittavat putken toista puolta samanaikaisesti, jolloin putki on koko ajan kuormitettuna eikä pääse palautumaan kuormituksesta.



Kuva 5.14. Neliakselisen auton aiheuttamat siirtymät 60 km/h nopeudella.



Kuva 5.15. Kolmiakselisen auton aiheuttamat siirtymät 60 km/h nopeudella.

Taulukoissa 5.13...5.17 on esitetty neliakselisen kuorma-auton aiheuttamat positiiviset maksimisiirtymät jokaisessa anturissa. Taulukoissa 5.18...5.22 on vastaavasti esitetty kolmiakselisen kuorma-auton aiheuttamat siirtymät. Jotta erisuuntaisten kuormitusten

vertailu olisi mielekästä, taulukoissa 5.13...5.22 antureiden s-1 ja s-3 sekä s-4 ja s-6 mittaustulokset on vaihdettu keskenään Tenholan suuntaisissa kuormituksissa. Kuvissa 5.16 ja 5.17 on vertailtu jokaisessa anturissa tapahtuvia siirtymiä nopeuksilla 20 km/h, 40 km/h, 60 km/h ja 80 km/h.

Taulukko 5.16. Neliakselisen auton aiheuttamat siirtymät antureissa pysäytyksen aikana.

4-aks. auto pysäytys	S-1 mm	S-2 mm	S-3 mm	S-4 mm	S-5 mm	S-6 mm
1. Tenholasta päin	-0,0179	0,0702	-0,0115	-0,0138	0,0649	-0,0105
2. Karjaalta päin	0,0212	0,0636	-0,0510	0,0117	0,0566	-0,0398
3. Tenholasta päin	-0,0059	0,0746	-0,0222	-0,0026	0,0640	-0,0203
keskiarvo	-0,0008	0,0694	-0,0282	-0,0016	0,0618	-0,0235
keskihajonta	0,0201	0,0055	0,0204	0,0128	0,0045	0,0149
variaatiokerroin	-	8,0 %	-	-	7,3 %	-

Taulukko 5.17. Neliakselisen auton aiheuttamat siirtymät antureissa 20 km/h nopeudella.

4-aks. 20 km/h	S-1 mm	S-2 mm	S-3 mm	S-4 mm	S-5 mm	S-6 mm
1. Tenholasta päin	0,0533	0,0721	0,0904	0,0479	0,0663	0,0745
2. Karjaalta päin	0,0565	0,0757	0,0854	0,0454	0,0644	0,0738
3. Tenholasta päin	0,0501	0,0770	0,0930	0,0434	0,0691	0,0743
keskiarvo	0,0533	0,0749	0,0896	0,0456	0,0666	0,0742
keskihajonta	0,0032	0,0026	0,0039	0,0022	0,0024	0,0003
variaatiokerroin	6,0 %	3,4 %	4,3 %	4,9 %	3,5 %	0,4 %

Taulukko 5.18. Neliakselisen auton aiheuttamat siirtymät antureissa 40 km/h nopeudella.

4-aks. auto 40 km/h	S-1 mm	S-2 mm	S-3 mm	S-4 mm	S-5 mm	S-6 mm
1. Karjaalta päin	0,0604	0,0745	0,0806	0,0493	0,0661	0,0727
2. Tenholasta päin	0,0507	0,0813	0,0904	0,0445	0,0755	0,0736
3. Karjaalta päin	0,0635	0,0759	0,0841	0,0535	0,0692	0,0757
keskiarvo	0,0582	0,0772	0,0850	0,0491	0,0703	0,0740
keskihajonta	0,0067	0,0036	0,0050	0,0045	0,0048	0,0016
variaatiokerroin	11,5 %	4,6 %	5,9 %	9,2 %	6,8 %	2,1 %

Taulukko 5.19. Neliakselisen auton aiheuttamat siirtymät antureissa 60 km/h nopeudella.

4-aks. auto 60 km/h	S-1 mm	S-2 mm	S-3 mm	S-4 mm	S-5 mm	S-6 mm
1. Karjaalta päin	0,0579	0,0731	0,0804	0,0488	0,0680	0,0751
2. Tenholasta päin	0,0593	0,0727	0,0868	0,0512	0,0677	0,0706
3. Karjaalta päin	0,0624	0,0751	0,0810	0,0519	0,0690	0,0757
keskiarvo	0,0599	0,0736	0,0828	0,0507	0,0682	0,0738
keskihajonta	0,0023	0,0013	0,0036	0,0016	0,0007	0,0028
variaatiokerroin	3,9 %	1,8 %	4,3 %	3,2 %	1,0 %	3,8 %

Taulukko 5.20. Neliakselisen auton aiheuttamat siirtymät antureissa 80 km/h nopeudella.

4-aks. auto 80 km/h	S-1 mm	S-2 mm	S-3 mm	S-4 mm	S-5 mm	S-6 mm
1. Karjaalta päin	0,0481	0,0736	0,0875	0,0431	0,0721	0,0831
2. Tenholasta päin	0,0575	0,0817	0,0839	0,0485	0,0761	0,0686
3. Karjaalta päin	0,0465	0,0757	0,0956	0,0421	0,0735	0,0898
keskiarvo	0,0507	0,0770	0,0890	0,0446	0,0739	0,0805
keskihajonta	0,0059	0,0042	0,0060	0,0035	0,0020	0,0108
variaatiokerroin	11,7 %	5,4 %	6,8 %	7,8 %	2,7 %	13,5 %

Taulukko 5.21. Kolmiakselisen auton aiheuttamat siirtymät antureissa pysäytyksen aikana.

3-aks. auto pysäytys	S-1 mm	S-2 mm	S-3 mm	S-4 mm	S-5 mm	S-6 mm
1. Tenholasta päin	0,0086	0,0705	-0,0365	0,0078	0,0635	-0,0312
2. Karjaalta päin	-0,0334	0,0724	0,0004	-0,0324	0,0736	0,0048
3. Tenholasta päin	0,0253	0,0710	-0,0527	0,0213	0,0619	-0,0444
keskiarvo	0,0002	0,0713	-0,0296	-0,0011	0,0663	-0,0236
keskihajonta	0,0302	0,0010	0,0272	0,0279	0,0063	0,0255
variaatiokerroin	-	1,4 %	-	-	9,6 %	-

Taulukko 5.22. Kolmiakselisen auton aiheuttamat siirtymät antureissa 20 km/h nopeudella.

3-aks. auto 20 km/h	S-1 mm	S-2 mm	S-3 mm	S-4 mm	S-5 mm	S-6 mm
1. Tenholasta päin	0,0489	0,0719	0,0822	0,0451	0,0628	0,0691
2. Karjaalta päin	0,0495	0,0738	0,0803	0,0469	0,0705	0,0764
3. Tenholasta päin	0,0488	0,0709	0,0808	0,0428	0,0584	0,0655
keskiarvo	0,0491	0,0722	0,0811	0,0449	0,0639	0,0704
keskihajonta	0,0004	0,0015	0,0010	0,0020	0,0061	0,0056
variaatiokerroin	0,7 %	2,0 %	1,2 %	4,5 %	9,5 %	7,9 %

Taulukko 5.23. Kolmiakselisen auton aiheuttamat siirtymät antureissa 40 km/h nopeudella.

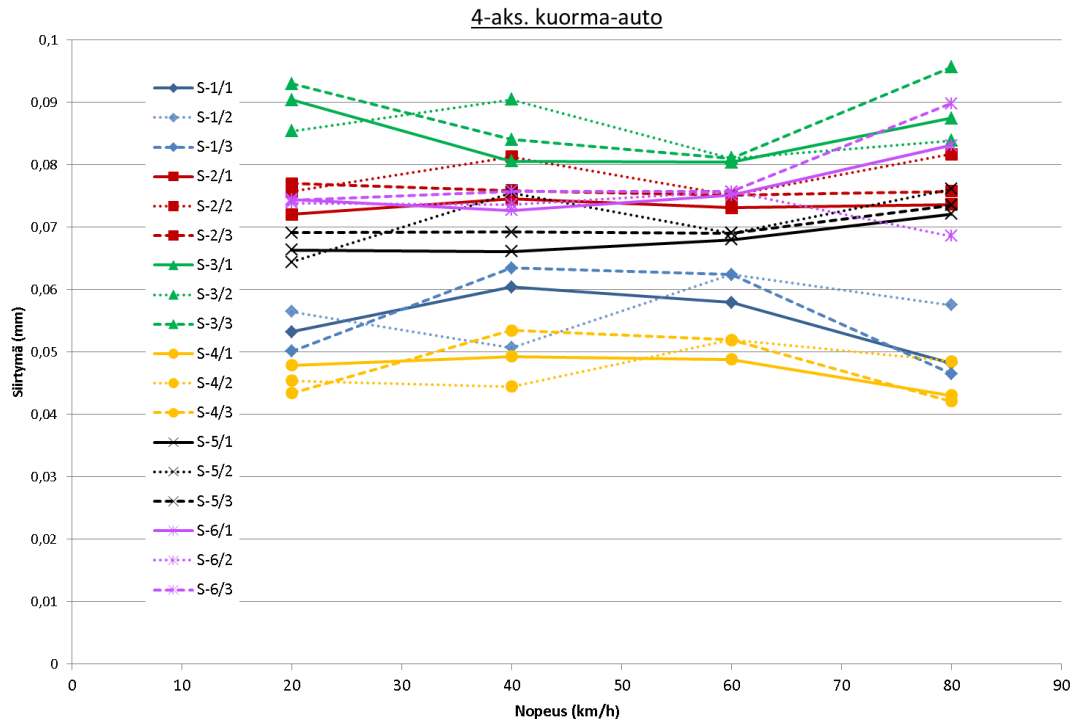
3-aks. auto 40 km/h	S-1 mm	S-2 mm	S-3 mm	S-4 mm	S-5 mm	S-6 mm
1. Karjaalta päin	0,0464	0,0799	0,0703	0,0420	0,0756	0,0667
2. Tenholasta päin	0,0532	0,0741	0,0798	0,0454	0,0623	0,0632
3. Karjaalta päin	0,0468	0,0837	0,0611	0,0447	0,0858	0,0607
keskiarvo	0,0488	0,0793	0,0704	0,0440	0,0745	0,0635
keskihajonta	0,0038	0,0048	0,0094	0,0018	0,0117	0,0030
variaatiokerroin	7,8 %	6,1 %	13,3 %	4,0 %	15,8 %	4,8 %

Taulukko 5.24. Kolmiakselisen auton aiheuttamat siirtymät antureissa 60 km/h nopeudella.

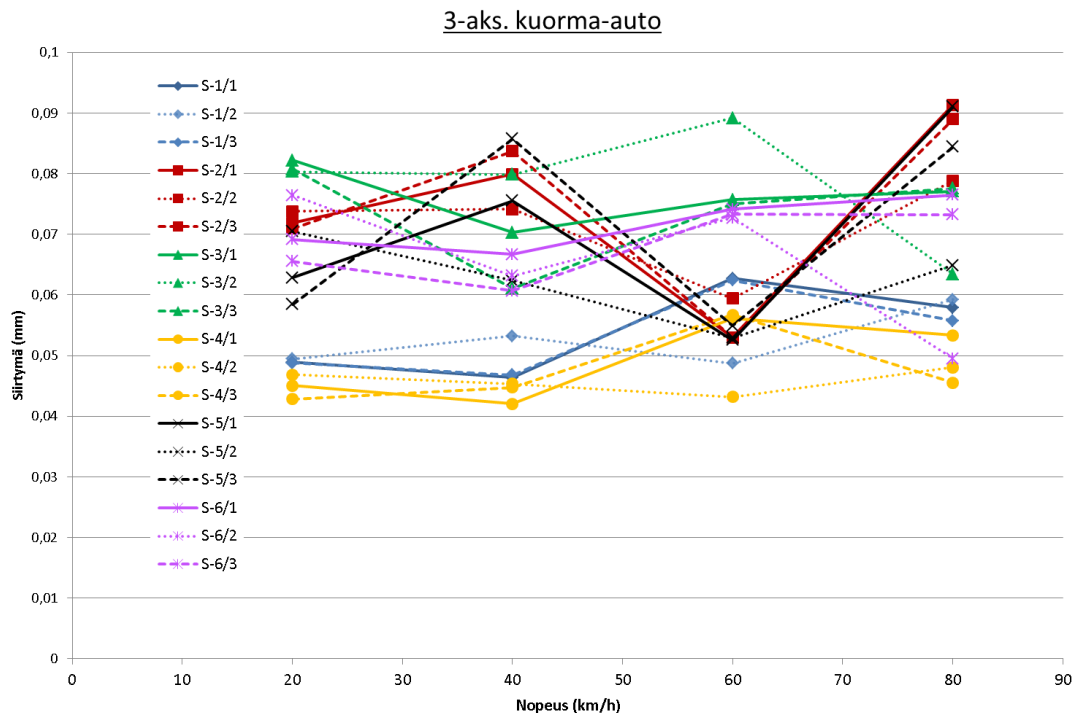
3-aks. auto 60 km/h	S-1 mm	S-2 mm	S-3 mm	S-4 mm	S-5 mm	S-6 mm
1. Karjaalta päin	0,0628	0,0530	0,0757	0,0561	0,0526	0,0741
2. Tenholasta päin	0,0487	0,0594	0,0892	0,0432	0,0529	0,0727
3. Karjaalta päin	0,0624	0,0530	0,0750	0,0567	0,0549	0,0733
keskiarvo	0,0579	0,0551	0,0800	0,0520	0,0535	0,0734
keskihajonta	0,0080	0,0037	0,0080	0,0077	0,0013	0,0007
variaatiokerroin	13,8 %	6,7 %	10,0 %	14,7 %	2,3 %	1,0 %

Taulukko 5.25. Kolmiakselisen auton aiheuttamat siirtymät antureissa 80 km/h nopeudella.

3-aks. auto 80 km/h	S-1 mm	S-2 mm	S-3 mm	S-4 mm	S-5 mm	S-6 mm
1. Karjaalta päin	0,0579	0,0914	0,0771	0,0533	0,0911	0,0765
2. Tenholasta päin	0,0592	0,0788	0,0634	0,0480	0,0649	0,0495
3. Karjaalta päin	0,0557	0,0890	0,0776	0,0455	0,0844	0,0732
keskiarvo	0,0576	0,0864	0,0727	0,0490	0,0801	0,0664
keskihajonta	0,0018	0,0067	0,0080	0,0040	0,0136	0,0147
variaatiokerroin	3,0 %	7,7 %	11,1 %	8,2 %	17,0 %	22,2 %



Kuva 5.16. Neliakselisen kuorma-auton aiheuttamat maksimisiirtymät jokaisessa anturissa eri nopeuksilla.



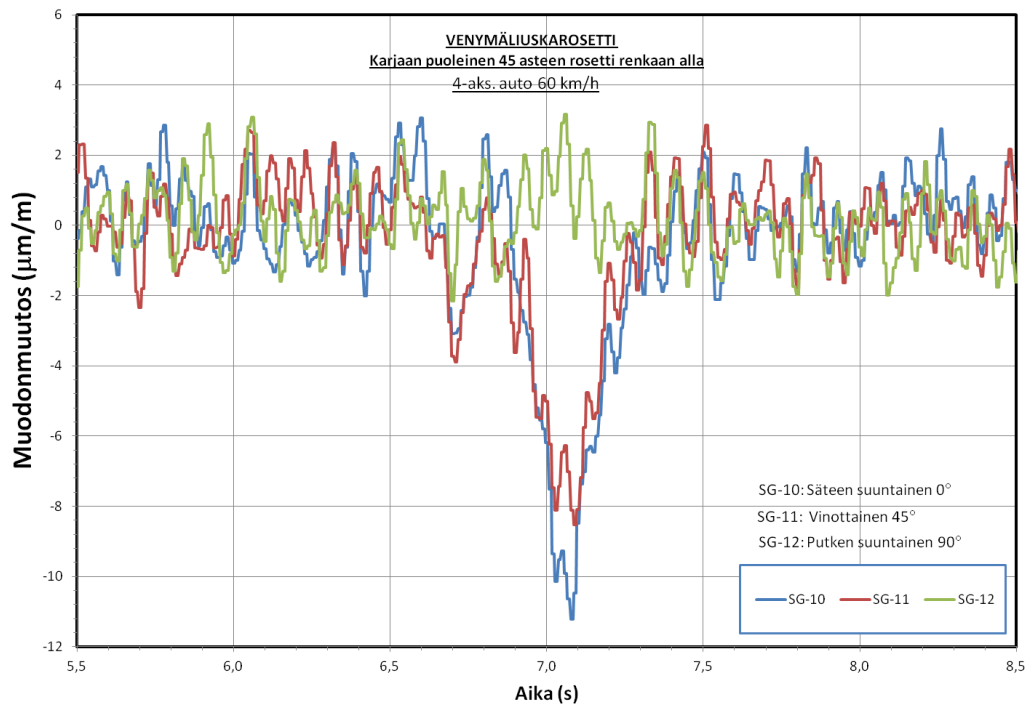
Kuva 5.17. Kolmiakselisen kuorma-auton aiheuttamat siirtymät jokaisessa anturissa eri nopeuksilla.

Putkessa mitattujen siirtymien arvoihin vaikutti missä linjassa ja kuinka tarkasti kuorma-autot ajoivat tiehen merkityn viivan päältä. Kolmeakselisen kuorma-auton tuloksista näkyy selvästi linjan ja tarkkuuden merkitys mitattujen siirtymien hajonnan suuruutena. Tuloksien perusteella kuorma-autojen nopeudella ei ole merkittävää vaikutusta putkessa tapahtuviin siirtymien suuruuteen kun putken päällä on noin 2,3 m:n täyttöä. Putken kuormitus suunnallakaan ei näyttäisi olevan tulosten perusteella merkitystä putkessa tapah-

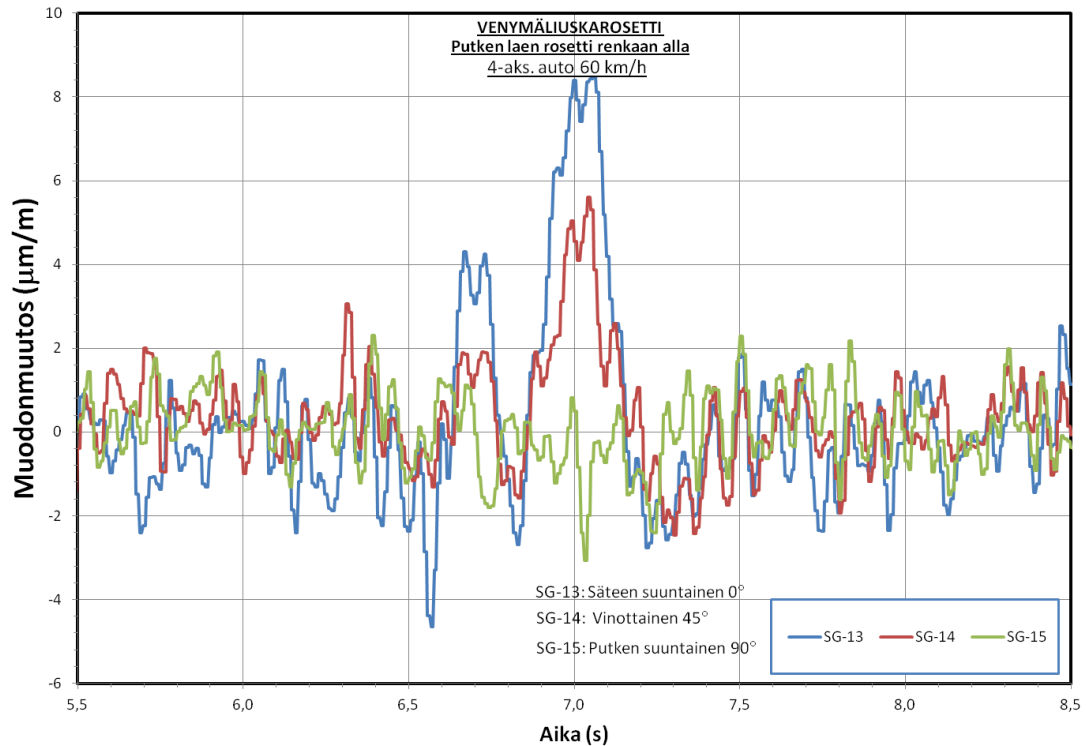
tuviin siirtymien suuruuteen, joten voidaan sanoa tulosten perusteella putken ympärystytön olevan putken molemmilta puolilta yhtä tiivistä. Kuorma-autojen akselivälin puolesta välistä mitatut siirtymät ovat selvästi suuremmat kuin renkaan alta mitatut.

Venymäliuskat

Kuvissa 5.18 ja 5.19 on esitetty neliakselisen kuorma-auton aiheuttamat muodonmuutokset renkaan alla Karjaan puoleisissa ja putken laen venymäliuskoissa ajan suhteen 60 km/h nopeudella. Venymäliuskojen kuvaajat ovat muodoltaan vastaavanlaisia kuin edellä esitetyt siirtymäantureiden kuvaajat. Kuvista 5.18 ja 5.19 nähdään venymäliuskojen tuloksissa taustakohinaa, joka suurimmaksi osaksi muodostuu kuorma-auton aiheuttamasta tärinästä tierakenteeseen. Tämän työn aikataulun takia taustakohinaa ei lähdetty suodattamaan pois vaan tuloksia tarkasteltiin taustakohinan kanssa. Kuvista 5.18 ja 5.19 nähdään putken suuntaisissa liuskoissa muodonmuutosten jäävän huomattavasti pienemmäksi kuin putken säteen suuntaisissa ja vinoissa liuskoissa. Putken suuntaisten liuskojen muodonmuutosten suuruus on niin pientä, että kuvaajista on vaikea varmuudella sanoa onko syntynyt muodonmuutospikki kuormituksen aiheuttama vai taustakohinaa.

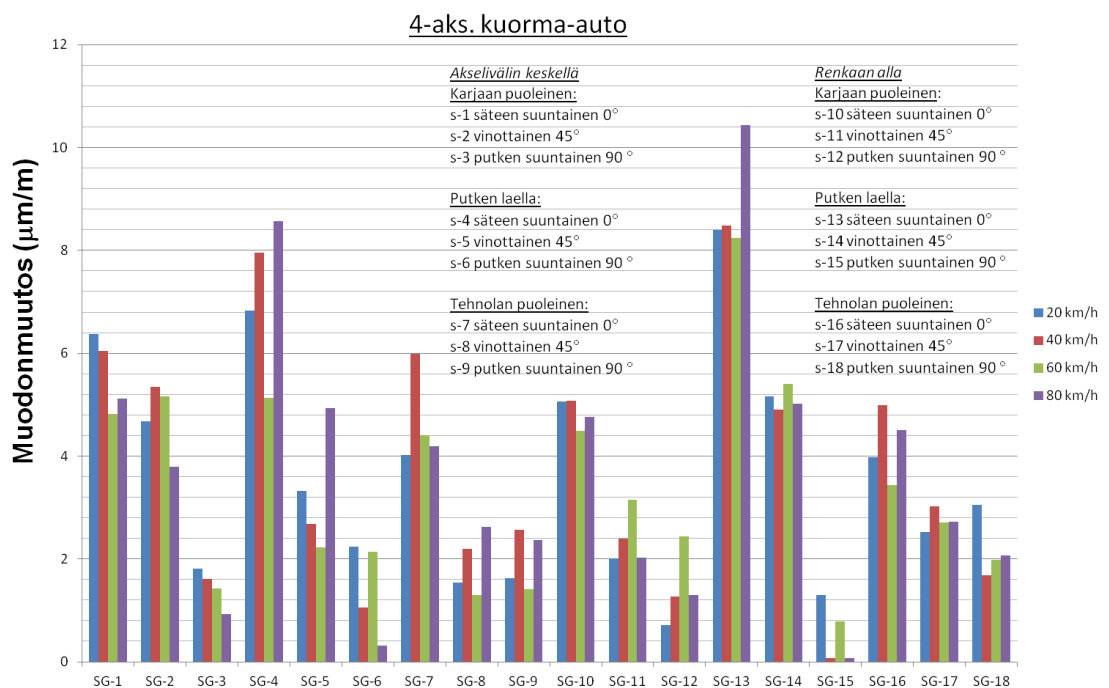


Kuva 5.18. Neliakselisen kuorma-auton aiheuttamat muodonmuutokset Karjaan puoleisessa venymäliuskarosetissa.

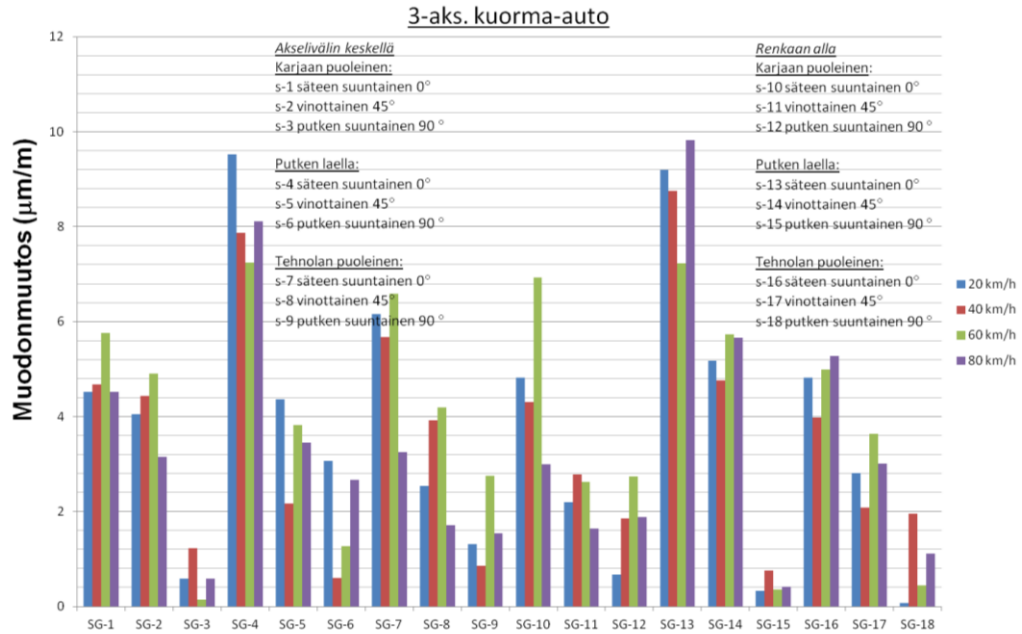


Kuva 5.19. Neliakselisen kuorma-auton aiheuttamat muodonmuutokset putken laen venymäliuskarosetissa.

Kuviin 5.20 ja 5.21 on kerätty jokaiselta ajetulta nopeudelta kuorma-autojen aiheuttamat maksimi vetomuodonmuutokset jokaisessa venymäliuskarosetin liuskoissa. Taulukkoihin 5.23-5.26 on laskettu kuvien 5.20 ja 5.21 vetomuodonmuutoksen arvoilla jokaiselle venymäliuskarosetille pääjännitysten suuruus ja suunta.



Kuva 5.20. Neliakselisen kuorma-auton aiheuttamat veto muodonmuutokset venymäliuskoissa.



Kuva 5.21. Kolmiakselisen kuorma-auton aiheuttamat veto muodonmuutokset venymäliuskoissa.

Taulukko 5.26. Neliakselisen kuorma-auton akselin välissä pääjännitysten suuruus ja suunta.

4-aks. auto	Kuorma-auton akselin keskellä olevat liuskat											
	Karjaan puoleinen rosetti Liuskat: s-1, s-2 ja s-3				Putken laen rosetti Liuskat: s-4, s-5 ja s-6				Tehnan puoleinen rosetti Liuskat: s-7, s-8 ja s-9			
	σ_1	σ_2	θ_1	θ_2	σ_1	σ_2	θ_1	θ_2	σ_1	σ_2	θ_1	θ_2
Nopeus	N/mm ²	N/mm ²	°	°	N/mm ²	N/mm ²	°	°	N/mm ²	N/mm ²	°	°
20 km/h	0,0908	0,0478	0,1	90,1	0,1005	0,0531	179,8	269,8	0,0637	0,0318	179,6	269,6
40 km/h	0,0893	0,0404	0,3	90,3	0,1119	0,0406	179,8	269,8	0,0971	0,0479	179,6	269,6
60 km/h	0,0772	0,0287	0,4	90,4	0,0805	0,0429	179,6	269,6	0,0693	0,0291	179,6	269,6
80 km/h	0,0715	0,0309	0,2	90,2	0,1131	0,0373	0,1	90,1	0,0658	0,0453	179,7	269,7

Taulukko 5.27. Neliakselisen kuorma-auton renkaan alla pääjännitysten suuruus ja suunta.

4-aks. auto	Kuorma-auton renkaan alla olevat liuskat											
	Karjaan puoleinen rosetti Liuskat: s-10, s-11 ja s-12				Putken laen rosetti Liuskat: s-13, s-14 ja s-15				Tehnan puoleinen rosetti Liuskat: s-16, s-17 ja s-18			
	σ_1	σ_2	θ_1	θ_2	σ_1	σ_2	θ_1	θ_2	σ_1	σ_2	θ_1	θ_2
Nopeus	N/mm ²	N/mm ²	°	°	N/mm ²	N/mm ²	°	°	N/mm ²	N/mm ²	°	°
20 km/h	0,0703	0,0276	179,8	269,8	0,1146	0,0496	0,0	90,0	0,0695	0,0496	179,4	269,4
40 km/h	0,0725	0,0349	179,8	269,8	0,1113	0,0336	0,1	90,1	0,0719	0,0411	179,9	269,9
60 km/h	0,0685	0,0490	179,9	269,9	0,1115	0,0416	0,1	90,1	0,0525	0,0393	180,0	270,0
80 km/h	0,0696	0,0332	179,7	269,7	0,1364	0,0416	180,0	270,0	0,0679	0,0434	179,8	269,8

Taulukko 5.28. Kolmiakselisen kuorma-auton akselin välissä pääjännitysten suuruus ja suunta.

3-aks. auto	Kuorma-auton akselin keskellä olevat liuskat											
	Karjaan puoleinen rosetti Liuskat: s-1, s-2 ja s-3				Putken laen rosetti Liuskat: s-4, s-5 ja s-6				Tehnan puoleinen rosetti Liuskat: s-7, s-8 ja s-9			
	σ_1	σ_2	θ_1	θ_2	σ_1	σ_2	θ_1	θ_2	σ_1	σ_2	θ_1	θ_2
Nopeus	N/mm ²	N/mm ²	°	°	N/mm ²	N/mm ²	°	°	N/mm ²	N/mm ²	°	°
20 km/h	0,0658	0,0205	0,3	90,3	0,1408	0,0722	179,7	269,7	0,0879	0,0386	179,8	269,8
40 km/h	0,0707	0,0293	0,4	90,4	0,1098	0,0335	179,7	269,7	0,0781	0,0326	0,1	90,1
60 km/h	0,0812	0,0188	0,3	90,3	0,0996	0,0446	179,9	269,9	0,0971	0,0611	179,9	269,9
80 km/h	0,0619	0,0245	0,1	90,1	0,1218	0,0609	179,7	269,7	0,0505	0,0307	179,7	269,7

Taulukko 5.29. Kolmiakselisen kuorma-auton renkaan alla pääjännitysten suuruus ja suunta.

3-aks. auto	Kuorma-auton renkaan alla olevat liuskat											
	Karjaan puoleinen rosetti Liuskat: s-10, s-11 ja s-12				Putken laen rosetti Liuskat: s-13, s-14 ja s-15				Tenholan puoleinen rosetti Liuskat: s-16, s-17 ja s-18			
	σ_1	σ_2	θ_1	θ_2	σ_1	σ_2	θ_1	θ_2	σ_1	σ_2	θ_1	θ_2
Nopeus	N/mm ²	N/mm ²	°	°	N/mm ²	N/mm ²	°	°	N/mm ²	N/mm ²	°	°
20 km/h	0,0661	0,0269	179,9	269,9	0,1214	0,0401	0,0	90,0	0,0634	0,0195	0,1	90,1
40 km/h	0,0637	0,0406	179,9	269,9	0,1171	0,0441	0,0	90,0	0,0625	0,0379	179,6	269,6
60 km/h	0,1096	0,0542	179,6	269,6	0,1003	0,0284	0,3	90,3	0,0684	0,0236	0,2	90,2
80 km/h	0,0503	0,0325	179,5	269,5	0,1299	0,0435	0,1	90,1	0,0732	0,0350	180,0	270,0

Taulukoiden 5.26-5.29 perusteella pääjännitys σ_1 on putken säteen suuntainen ja pääjännitys σ_2 on putken pituussuuntainen. Pääjännitys σ_1 on selvästi jokaisessa venymäliuskarosetissa pääjännitystä σ_2 suurempi. Pääjännityksen σ_1 suuruus on keskimäärin putken laen kohdalla 0,11 N/mm², joka on erittäin pieni verrattuna taulukossa 2.1 esitettyyn putken vetolujuusarvoon.

6 Laboratoriokokeet

6.1 Maanpohjan luokituskokeet

Åkerfeltin pohjamaalle suoritettiin maalajiluokituskokeet kolmelta eri syvyystasolta otetuille maanäytteille. Maanäytteet otettiin puron pohjalta 4 m:n päästä etelän puoleisen putken suulta kierrekairalla syvyyksiltä 0-200 mm, 200-400 mm ja 400-600 mm. Jokaista maanäytteestä määritettiin rakeisuus spesifikaation CEN ISO/TS 17892-4 mukaisesti. Areometrin (hydrometrin) avulla määritettiin 0,074 mm pienempien rakeiden jakautuma ja pienellä pesuseulonnalla areometrikokeen jälkeen maanäytteille määritettiin 0,074 mm suurempien rakeiden jakautuma. Liitteessä 3 on esitetty kaikkien näytteiden pesuseulonnan ja areometrikokeen yhdistetyt rakeisuuskäyrät. Maanäytteelle suoritettiin myös humuspitoisuuden määrittäminen polttomenetelmällä GLO-85 mukaisesti ja kiintotiheyden määrittäminen spesifikaation CEN ISO/TS 17892-3 mukaisesti. Humuspitoisuuden ja kiintotiheyden määrittäminen tehtiin kahdella rinnakkaisnäytteellä. Taulukossa 6.1 on esitetty maanäytteiden luokitusominaisuuksia. Luokituskokeiden perusteella maanäytteiden maalaji on hiekkainen siltti. Humuspitoisuus maanäytteillä on alle 3 %, joten humuksella ei ole suurta vaikutusta maanäytteiden geoteknisiin ominaisuuksiin.

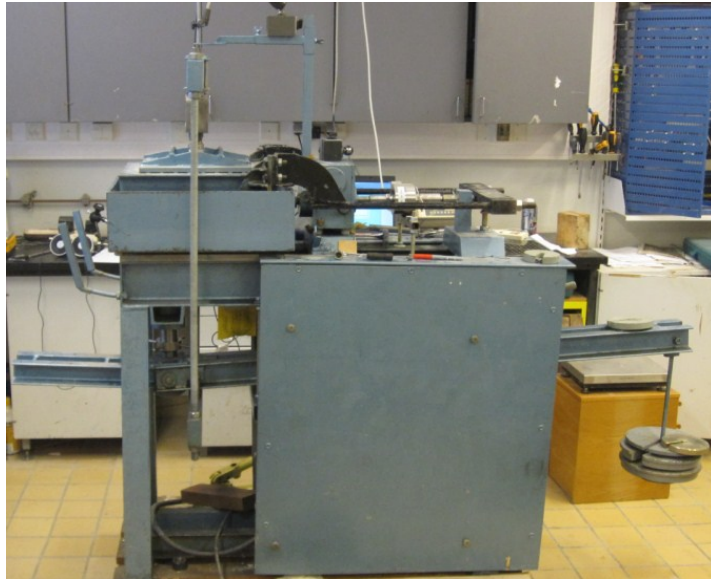
Taulukko 6.1. Maanäytteiden luokitusominaisuudet laboratoriokokeiden perusteella.

Maanäytteet	Maalaji (ISO)	ρ_s (kg/m ³)	Humus-%
Näyte 1 (0-0,2 m)	saSi	2690	2,90
Näyte 2 (0,2-0,4 m)	saSi	2740	2,73
Näyte 3 (0,4-0,6 m)	saSi	2650	2,14

6.2 Lujuusominaisuudet

6.2.1 Rasialeikkauskokeen koejärjestelyt

Rasialeikkauskokeen tarkoituksena oli määrittää Åkerfeltin koekohteen putkea vasten olevan ympäristäytön kitkakulma. Kokeessa käytettiin Leonard Farnell & Co Ltd:n valmistamaa rasialeikklauslaitetta. Laite koostuu leikkausrasiasta, kuormituspalkista, sähkömoottorista, kuormituslevystä ja kuorman kuormituslevylle välittävästä kuormituskehikosta. Kuvassa 6.1 on esitetty kokeessa käytetty rasialeikklauslaite.



Kuva 6.1. Rasialeikkauslaite.

Leikkausrasia

Leikkausrasia koostuu kahdesta päällekkäin olevasta suorakulmaisesta laatikosta, joiden sisäleveydet ja -pituudet ovat 300 mm. Laatikoiden korkeudet ovat 87 mm. Alimman laatikon vapaakorkeus on 75 mm pohjalla käytettävän rivoitetun teräslevyn vuoksi. Laatikot on sijoitettu laakerikaistoilla kulkevan kelkan päälle, jota liikutetaan sähkömoottorilla. Ylempi laatikko on kiinnitetty rasialeikkauslaitteen runkoon niin, että ylemmän laatikon vaakasuuntainen siirtymä on estetty. Näin ollen kelkan liikkua vain alapuolinen laatikko liikkuu kelkan mukana.

Kuormituslevy ja kuormituskehikko

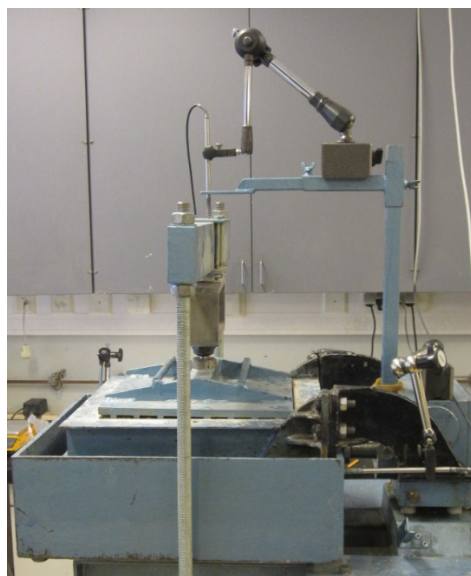
Kuormituslevyn tarkoitus on jakaa pystysuuntainen voima tasaisesti koko koenäytteen pinnalle. Kuormituslevyn alapinta on rivoitettu kahdeksalla rivillä joiden leveydet ovat 10 mm ja korkeudet 7 mm. Ripojen tarkoitus on estää kokeen aikana koenäytteen liukumisen kuormituslevyn alapinnassa. Kuormituslevyn paino on 13,792 kg. Pystysuuntainen kuormitus siirretään kuormituslevylle kuormituskehikolla kuormituslevyn keskellä olevan kuulalaakerin välityksellä. Kuulalaakeri mahdollistaa kokeen aikana kuormituslevyn kallistumisen koenäytteessä tapahtuvien sisäisten muodonmuutosten johdosta. Kuormituskehikkoon on kiinnitetty mittakello, jolla mitataan koenäytteeseen välittyvää puristavaa voimaa. Kuormituskehikko on lisäksi kiinnitetty kuormituspalkkiin. Kuvasa 6.2 on esitetty kuormituslevy ja -kehikko.



Kuva 6.2. Kuormituslevy ja -kehikko.

Anturit ja mittauslaitteet

Kokeissa käytettiin kolmea anturia, joista kahdella anturilla mitattiin kokeen aikana tapahtuvia siirtymiä ja kolmannella anturilla leikkausvoimaa. Siirtymäantureina käytettiin kalibroituja Solartronin valmistamia induktiivisia siirtymäantureita (Solartron 2014). Vaakasuuntainen siirtymäanturi sijoitettiin leikkausrasiakoneen runkoon magneettijalalla mittaamaan alarasian siirtymää. Pystysuuntainen siirtymäanturi sijoitettiin kuormituskehikon yläpuolelle. Leikkausvoimaa mitattiin käyttämällä HBM U2B voimaanturia, jonka suurin mahdollinen voiman mittausta on 20 kN (HBM 2014e). Anturit kiinnitettiin HBM QuantumX MX840A tiedonkeruulaitteeseen (HBM 2014a). Tuloksia mitattiin kerran sekunnissa jokaisessa kolmessa mittauskanavassa. Tiedonkeruulaite kytkettiin vastaavasti tietokoneeseen kiinni. Tietokoneessa käytettiin HBM laitevalmistajan tietokoneohjelmaa CatmanAP versiota 3.3.1 (HBM 2014d). Kuvassa 6.3 on esitetty siirtymäantureiden sijoitus leikkausrasiaan.



Kuva 6.3. Siirtymäantureiden sijainnit.

Näyte

Näytteenä käytettiin Åkerfeltin koekohteen ympäristäytön mursketta. Näyte otettiin putken etelä- ja pohjoispäästä putkea vastaan olevasta murskeesta. Putken kummankin pään murskenäytteelle suoritettiin spesifikaation CEN ISO/TS 17892-4 mukainen rakeisuuden määrittäminen kuivaseulonnalla ja standardin EN ISO 14688-2 mukainen maalajiluokitus. Liitteessä 4 on esitetty murskeen rakeisuuskäyrät ja liitteessä 5 on esitetty murskeen maalajiluokitus. Rakeisuuskäyrien perusteella voidaan sanoa murskeen olevan samasta murske-erästä ja niiden geotekniset ominaisuudet olevan samat. Näin ollen näytteet valmistettiin sekoittamalla puolet eteläpäädyn ja puolet pohjoispäädyn näytettä.

Spesifikaation CEN ISO/TS 17892-10 kohdan 5.2.1.2 mukaan koenäytteen suurin raekoko ei saa olla suurempi kuin 1/5 koenäytteen korkeudesta. Raekoko leikkausrasiassa määräytyy alimman laatikon pienemmästä vapaasta korkeudesta. Näin ollen suurin sallittu raekoko saa olla enintään 15 mm, joten sekoitetut näytteet seulottiin 16 mm seulan läpi.

6.2.2 Kokeen suoritus

Rasialeikkauskoe suoritettiin spesifikaation CEN ISO/TS 17892-10 mukaisesti. Kitkakulman määrittämiseksi suoritettiin koesarja 50 kPa, 100 kPa ja 150 kPa pystyjännityksillä niin, että jokaiselle pystyjännitykselle seulottiin ja tiivistettiin oma koenäyte. Kokeet suoritettiin kosteille näytteille ja jokaiselle näytteelle määritettiin vesipitoisuus leikkauspinnan kohdalta spesifikaation CEN ISO/TS 17892-1 mukaan ennen koetta. Näytteelle suoritettiin konsolidaatio eli tiivistäminen ja leikkaus. Ennen näytteen tiivistämistä leikkausrasian laatikot kiinnitettiin yhteen kahdella pultilla, jotta koenäytteessä ei pääsisi tapahtumaan konsolidaation aikana vaakasuuntaisia muodonmuutoksia. Näytteen tiivistämisen jälkeen kuormituslevy ja -kehikko nostettiin paikoilleen ja anturit asennettiin paikoilleen.

Konsolidaatio

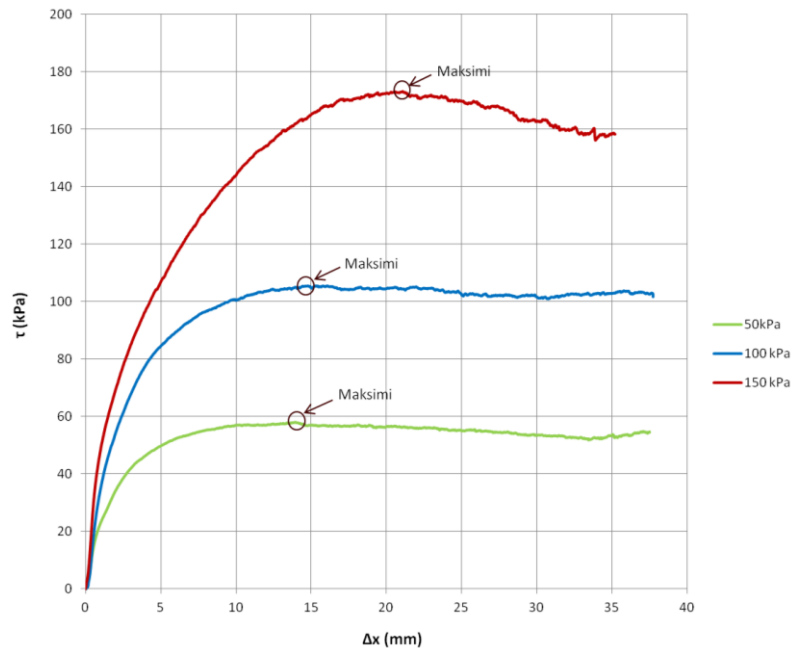
Konsolidaatiossa pystyjännitystä lisättiin vaihteittain kuormittamalla kuormituspalkkia levypainoilla kunnes haluttu pystyjännitys saavutettiin. Kuormituslevyn neljän kulman painumista mitattiin työntömitalla jokaisen lisätyn levypainon jälkeen ja seuraava levypaino lisättiin vasta kun kuormituslevyn painuma oli tasaantunut. Ajan mittaus aloitettiin välittömästi kuormituksen lisäyksen jälkeen ja kuormituslevyn keskipisteen painumaa mitattiin. Konsolidaatio lopetettiin kun pystysuoran muodonmuutoksen ja kuluneen ajan suhteen piirretyn kuvaajan perusteella voitiin arvioida näytteen tiivistyneen ja konsolidaation tapahtuneen.

Leikkaus

Ennen leikkausta pultit poistettiin niin, että näytettä ei päässyt tunkeutumaan laatikoiden väliin. Leikkauksen aikana pystysuuntainen voima pidettiin koenäytteessä samana kuin konsolidaation aikana. Koenäytettä leikattiin 0,5 mm/min vakionopeudella. Koenäytteen tiivistymistä ja löyhtymistä mitattiin kuormituskehikon päälle asennetulla pystysuuntaisella anturilla. Lisäksi mitattiin sähkömoottorin aiheuttamaa leikkausvoimaa koenäytteessä ja kelkan vaakasuuntaista siirtymää. Koe suoritettiin laitteen koko mitta-alueella 0-38 mm. Kokeen jälkeen koenäytteessä tapahtuneiden muodonmuutosten aiheuttamaa kuormituslevyn kallistumaa mitattiin kuormituslevyn kaikista neljästä kulmasta.

6.2.3 Koetulokset ja niiden tulkinta

Leikkausvaiheen koesarjan 50 kPa, 100 kPa ja 150 kPa pystyjännitysten leikkausjännitys-venymäkuvaajat on esitetty kuvassa 6.5. Taulukossa 6.2 on esitetty koesarjan leikkausjännitysten maksimi-arvot ja niitä vastaavat vaakasiirtymät. Leikkausjännityksessä on otettu huomioon jatkuva leikkauspinta-alan muuttuminen alarasian liikkuaessa. Kuormitusnopeutena oli 0,5 mm/min, joten leikkauspinta-ala pieneni 90000 mm²:n pinta-alasta 78700 mm²:n pinta-alaan kokeen aikana. Kuvasta 6.4 nähdään että jokaisella pystyjännityksen arvolla murske käyttäytyy pienillä leikkausjännityksen arvoilla lineaarisesti, jonka jälkeen murskeessa tapahtuu myötölujittumista kunnes saavutetaan maksimileikkausjännityksen arvo, jolloin rakeiden välisessä leikkauspinnassa tapahtuu murtuminen ja leikkausjännityksen arvo murskeessa pienenee.

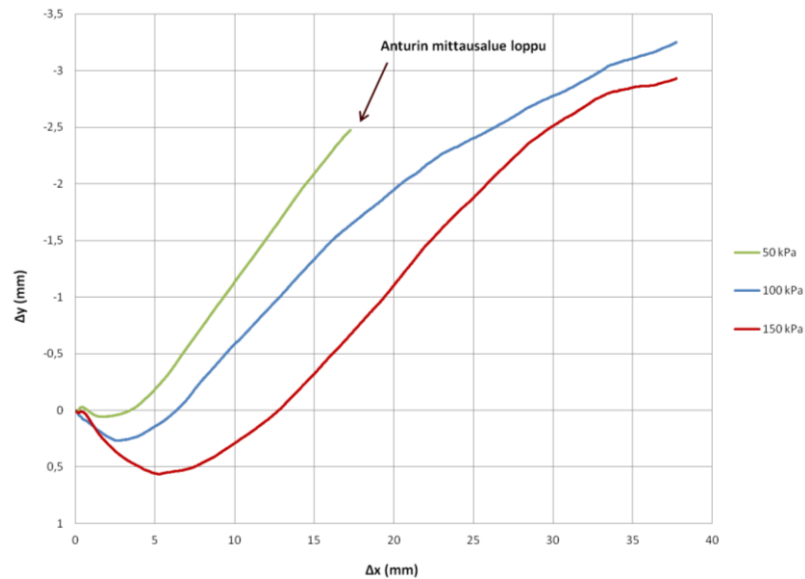


Kuva 6.4. Koesarjan leikkausjännitys-venymäkuvaajat.

Taulukko 6.2. Leikkausjännityksen maksimi arvot ja niitä vastaavat vaakasiirtymät.

Koe	σ [kPa]	τ_{max} [kPa]	Δx [mm]
Koe 1	50	57,94	13,9
Koe 2	100	105,46	14,8
Koe 3	150	173,24	21,1

Kuvassa 6.5 on esitetty leikkausvaiheen koesarjan pystysiirtymä-vaakasiirtymäkuvaajat ja taulukossa 6.3 on esitetty koenäytteiden vesipitoisuudet, alkuperäiset irtotiheydet ja kuivairtitiheydet. Kuvasta 6.5 nähdään, että pienillä vaakasuuntaisilla muodonmuutoksen arvoilla murskeen tiivistyminen loppuu, jonka jälkeen rakeet pyrkivät liikkumaan toistensa suhteen synnyttäen samalla murskeeseen leikkauspinnan. Kuvan 6.5 mukainen murskeen löyhtyminen pakotetun leikkauksen aikana vastaa tiiviiden kitkamaalajien tavanomaista käyttäytymistä.



Kuva 6.5. Koesarjan pystysiirtymä-vaakasiirtymäkuvaajat.

Taulukko 6.3. Koenäytteiden vesipitoisuudet, alkuperäiset irtotiheydet ja kuvairtotiheydet kokeen alussa.

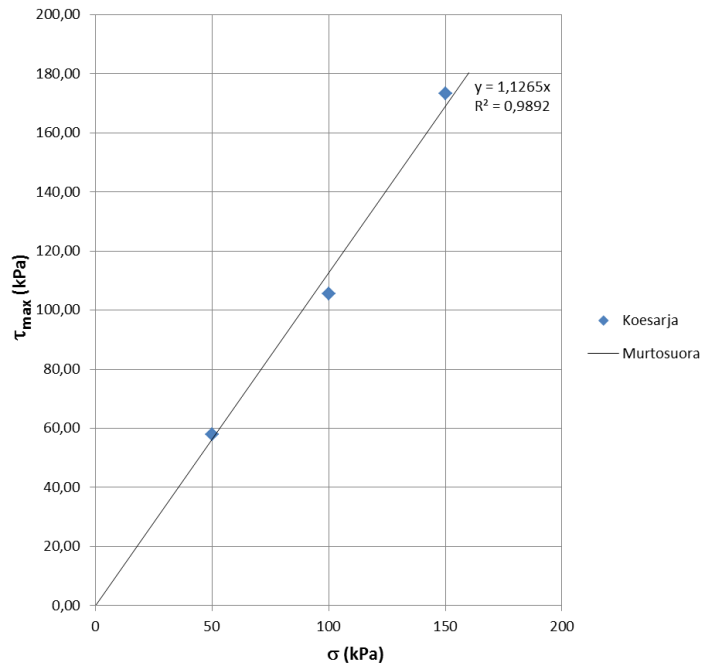
Koe	ρ [kg/m ³]	ρ_d [kg/m ³]	w [%]
Koe 1	2150	2090	2,77
Koe 2	2150	2090	2,77
Koe 3	1880	1850	1,86

Ympäristäytön kitkakulma määritettiin koesarjan tuloksista Mohr-Coulombin murtokriteerillä. Murtokriteeri perustuu yhdistettyyn Mohr-Coulombin teoriaan, jossa materiaalin murtuminen aiheutuu normaalijännityksen ja leikkausjännityksen kombinaatiosta. Maan leikkauslujuus Mohr-Coulombin teorian mukaan voidaan ilmaista kaavalla (6.1) (Hunt 1986, s. 35-36)

$$\tau = \sigma \cdot \tan(\varphi) + c \quad (6.1)$$

missä c on koheesio (kPa)
 φ on maan sisäinen kitkakulma (°)
 σ on murtopinnalla vaikuttava kokonaisnormaalijännitys (kPa)
 τ on murtopinnalla vaikuttava leikkausjännitys (kPa)

Kitkamaalajeille koheesio on nolla, joten kitkamaalajin kitkakulma määritetään leikkausjännityksen ja normaalijännityksen perusteella. Kuvassa 6.6 on esitetty koesarjan leikkausjännityksen maksimiarvot leikkausjännitys-normaalijännityskuvaajana, jossa pisteiden välille on piirretty murtosuoraa kuvaava sovituskäyrä. Ympäristäytön kitkakulma määritetään kuvaajan sovituskäyrän kulmakertoimesta.



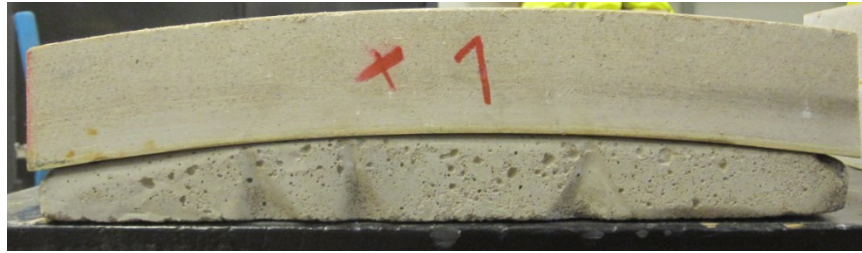
Kuva 6.6. Koesarjan leikkausjännitys-normaalijännityskuvaaja.

Ympäristäytön kitkakulmaksi määräytyi sovituskäyrän kulmakertoimen perusteella $48,4^\circ$. Koesarjan leikkausjännityksen maksimi arvojen väliseksi korrelaatiokertoimeksi saatiin 0,9892, joten kokeiden välinen lineaarinen riippuvuus oli suuri. Näin ollen määritettyä kitkakulman arvoa voidaan pitää luotettavana.

6.3 Maan ja putken välinen kitkakoe

6.3.1 Koejärjestelyt

Kokeen tarkoituksena oli määrittää Åkerfeltin koekohteen putken ympäristäytön ja putken välinen kitkakulma. Maan ja putken välinen kitkakulma määritettiin sekä putken säteen suunnassa että putken pituussuunnassa. Kitkakokeissa käytettiin kappaleessa 6.2.1 esitettyjä rasialeikkauslaitetta, mittausvälineitä ja koenäytettä. Kitkakokeissa käytettiin ulkohalkaisijaltaan 2047 mm:n ja 45 mm:n seinämävahvuudeltaan olevaa putkea, josta sahattiin kivisahalla kolme rasialeikkauslaitteen alarasiaan mahtuvaa kappaletta. Jotta kappaleiden yläpinnat saatiin asetettua alarasian yläpinnan tasolle, kappaleille valmistettiin valamalla betonista korokekappale. Muottina betonikappaleen valmistamiseen käytettiin rasialeikkauslaitteen alarasiaa ja putkikappaletta, jonka alapintaa vasten betoni valettiin. Tällä tavoin saatiin betonikappaleen yläpinnasta putkikappaleen alapinnan muotoinen. Putkikappaleen yläpinnan oikeaan tasoon saamisen lisäksi betonisella kappaleella estettiin putkikappaleiden taipuminen ja siten putkikappaleen mahdollinen rikkoontuminen kokeen aikana. Kuvassa 6.7 on esitetty sahattu putkikappale ja betoninen korokekappale.



Kuva 6.7. Betoninen korokekappale ja sahattu putkikappale.

Putken pituussuuntaiseen kokeeseen tehtiin ylärasian alareunaan ohjauslevy teräslevystä, jonka alapinta muotoiltiin putken yläpinnan muotoiseksi. Teräslevyn alapinnan ja putken väliin jätettiin 2 mm:n rako, jotta kitkaa ei syntyisi putken ja teräslevyn välillä. Teräslevyn avulla saatiin ohjattua leikkauspinta koko putkikappaleen pinnan alalle. Kuvassa 6.8 on esitetty teräksinen ohjauslevy ja sen kiinnitys ylärasiaan.



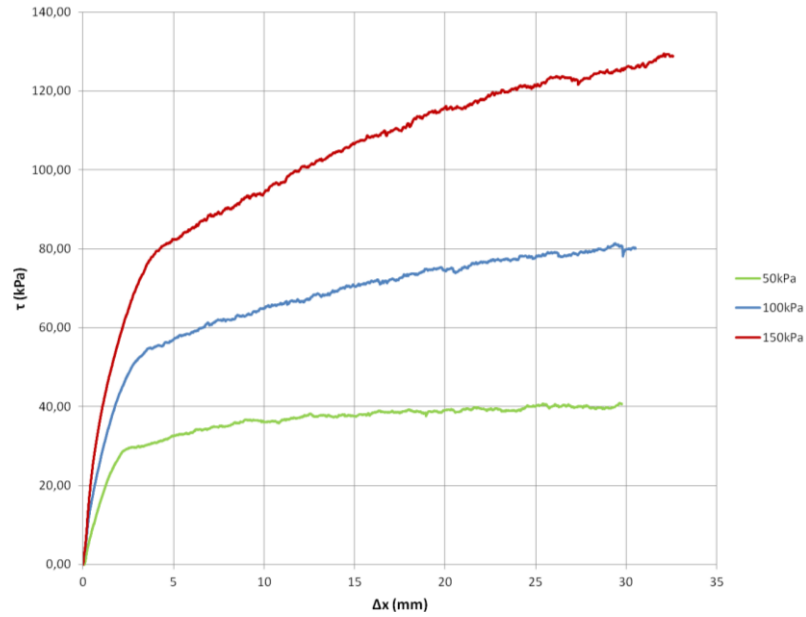
Kuva 6.8. Teräksinen ohjauslevyn kiinnitys ylärasiaan pituussuuntaisessa kokeessa.

6.3.2 Kokeen suoritus

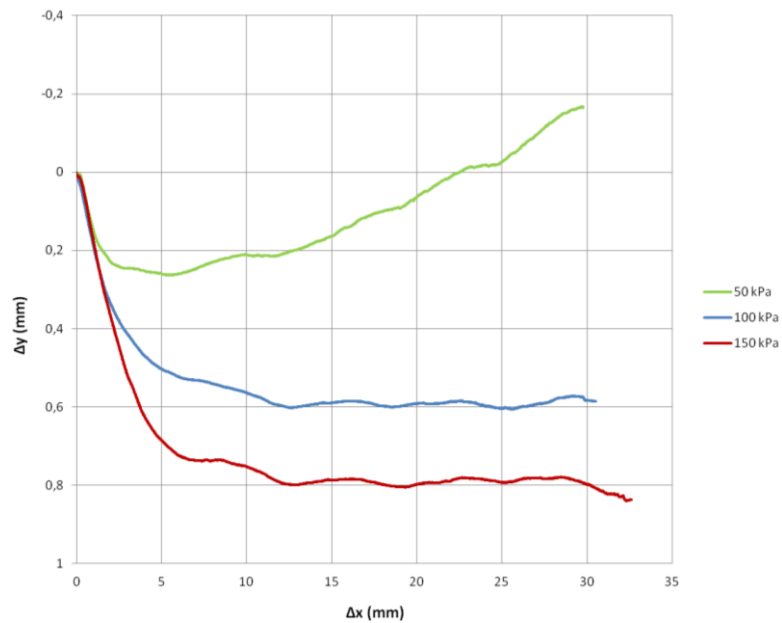
Koe suoritettiin spesifikaation CEN ISO/TS 17892-10 mukaisesti. Kitkakulma määritettiin kummassakin putken suunnassa 50 kPa, 100 kPa ja 150 kPa pystyjännityksillä ja jokaiselle pystyjännitykselle seulottiin ja tiivistettiin oma maanäyte sekä käytettiin omaa putkikappaletta. Jokaiselle maanäytteelle määritettiin vesipitoisuus leikkauspinnan kohdalta spesifikaation CEN ISO/TS 17892-1 mukaan ennen kokeita. Kokeet suoritettiin kappaleessa 6.2.2 esitetyllä tavalla.

6.3.3 Koetulokset

Leikkausjännityksen laskemissa ei otettu huomioon kappaleen kaarevuudesta pinnan normaalivoimaa laskiessa. Kappaleen reunoilla pinnan normaalivoima on pystyakseliin nähden 8,4 asteen kulmassa, jolloin pinnan normaalivoiman suuruus on noin 1 % suurempi kuin kappaleen keskellä. Näin ollen tällä laskenta oletuksella ei ole merkittävää vaikutusta kitkakulman suuruuteen. Maan ja putken säteen suuntaisen koesarjan leikkausvaiheen leikkausjännitys-venymäkuvaajat on esitetty kuvassa 6.9 ja kuvassa 6.10 on esitetty koesarjan pystysiirtymä-vaakasiirtymäkuvaajat.



Kuva 6.9. Maan ja putken säteen suuntaisen koesarjan leikkausjännitys-venymäkuvaajat.



Kuva 6.10. Maan ja putken säteen suuntaisen välisen koesarjan pystysiirtymä-vaakasiirtymäkuvaajat.

Kuvasta 6.9 huomataan jokaisessa koesarjan kokeen kuvaajassa on selvä muutoskohta alle 5 mm vaakasiirtymillä. Kuvaajissa ei ole havaittavissa tiiveille kitkamaalajeille tyyppistä leikkausjännityksen maksimiarvoa, jonka jälkeen leikkausjännityksen arvo lähti laskemaan. Lisäksi kuvassa 6.10 huomataan 100 kPa ja 150 kPa normaalijännityksen arvoilla murske tiivistyy koko kokeen aikana eikä siinä tapahdu tiiveille kitkamaalajeille tavanomaista löyhtymistä (dilataatiota) pakotetussa leikkauksessa. Nämä viittaavat maan ja putken välisen lepokitkan ylittymiseen leikkausjännityksen muutoskohdissa.

Maan ja putken säteen suuntaisen koesarjan kitkakulma määritettiin leikkausjännityksen muutoskohdissa. Taulukossa 6.4 on esitetty koesarjan leikkausjännitysten arvot muutoskohdissa ja niitä vastaavat vaakasiirtymät. Taulukossa 6.5 on esitetty koenäytteiden

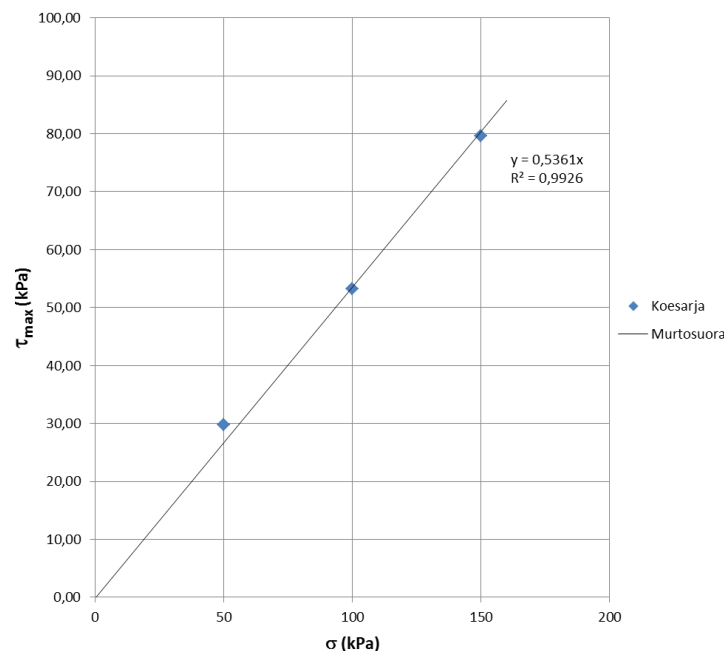
vesipitoisuudet, alkuperäiset irtotiheydet ja kuivairtitiheydet kokeen alussa. Kuvassa 6.11 on esitetty taulukon 6.4 arvot leikkausjännitys-normaalijännityskuvaajana, jossa pisteiden välille on piirretty murtosuoraa kuvaava sovituskäyrä. Kitkakulma määritettiin sovituskäyrän kulmakertoimesta.

Taulukko 6.4. Maan ja putken säteen suuntaisen koesarjan leikkausjännitysten muutoskohdan arvot ja niitä vastaavat vaakasiirtymät.

Koe	σ [kPa]	τ_{\max} [kPa]	Δx [mm]
Koe 1	50	29,73	2,7
Koe 2	100	53,26	3,3
Koe 3	150	79,67	4,2

Taulukko 6.5. Maan ja putken säteen suuntaisen koesarjan koenäytteiden vesipitoisuudet, alkuperäiset irtotiheydet ja kuivairtitiheydet kokeen alussa.

Koe	ρ [kg/m ³]	ρ_d [kg/m ³]	w [%]
Koe 1	1770	1710	3,51
Koe 2	1800	1710	5,14
Koe 3	1800	1730	3,89

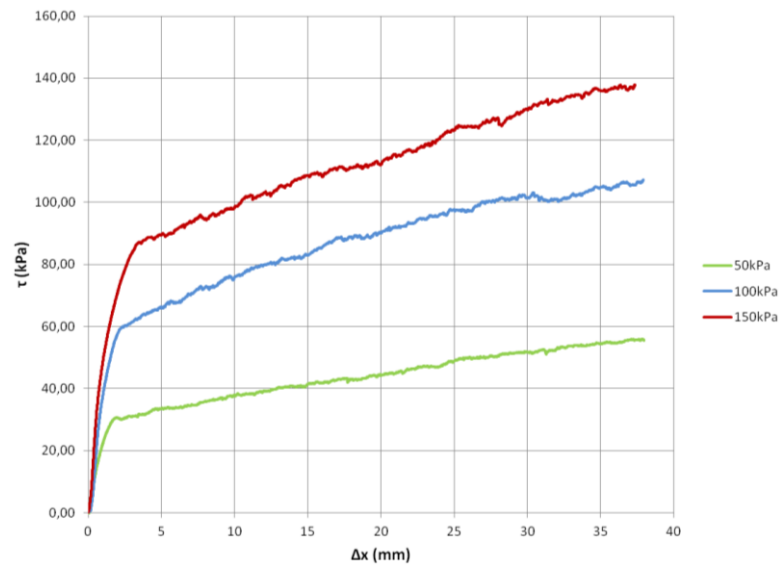


Kuva 6.11. Maan ja putken säteen suuntaisen koesarjan leikkausjännitys-normaalijännityskuvaaja.

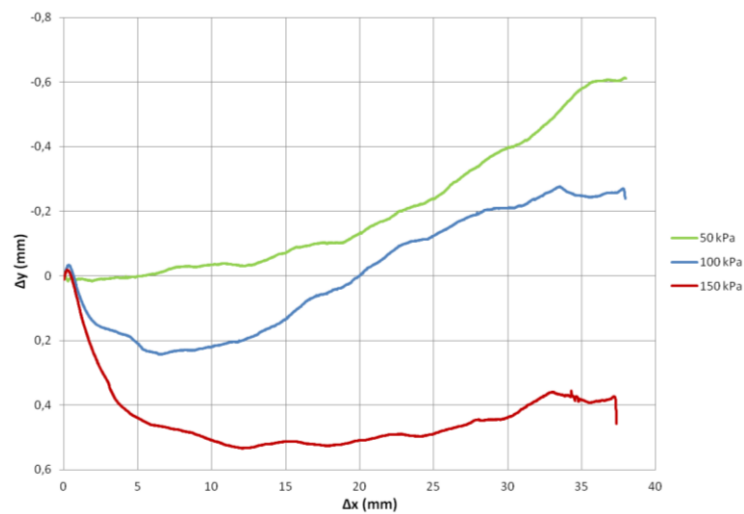
Maan ja putken säteen suuntaisen koesarjan kitkakulmaksi määräytyi sovituskäyrän kulmakertoimen perusteella 28,2°. Koesarjan leikkausjännityksen maksimi arvojen väliseksi korrelaatiokertoimeksi saatiin 0,9926, joten kokeiden välinen lineaarinen riippuvuus on suuri. Näin ollen määriteltyä kitkakulman arvoa voidaan pitää erittäin luotettavana. Kitkakerroin ilmaistaan kitkakulman tangenttina, joten putken pinnan kitkakertoimeksi saatiin putken säteen suunnassa 0,54.

Maan ja putken pituussuuntaisen koesarjan leikkausvaiheen leikkausjännitysvienymäkuvaajat on esitetty kuvassa 6.12. Kuvassa 6.13 on esitetty pituussuuntaisen

koesarjan pystysiirtymä-vaakasiirtymäkuvaajat. Kuvasta 6.12 huomataan niin ikään pituussuuntaisessa koesarjassa maan ja putken välisen lepokitkan ylittyvän pienillä vaakasiirtymän arvoilla.



Kuva 6.12. Maan ja putken pituussuuntaisen koesarjan leikkausjännitys-venymäkuvaajat.



Kuva 6.13. Maan ja putken pituussuuntaisen koesarjan pystysiirtymä-vaakasiirtymäkuvaajat.

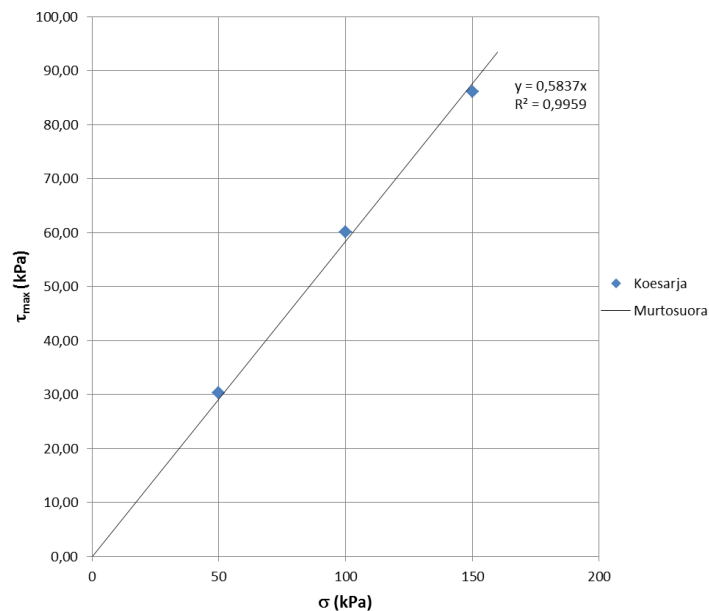
Taulukossa 6.6 on esitetty koesarjan leikkausjännitysten arvot muutoskohdissa ja niitä vastaavat vaakasiirtymät. Taulukossa 6.7 on esitetty koenäytteiden vesipitoisuudet, alkuperäiset irtotiheydet ja kuivairtitiheydet kokeen alussa. Kuvassa 6.14 on esitetty taulukon 6.6 arvot leikkausjännitys-normaalijännityskuvaajana,

Taulukko 6.6. Maan ja putken pituussuuntaisen koesarjan leikkausjännitysten muutoskohdan arvot ja niitä vastaavat vaakasiirtymät.

Koe	σ [kPa]	τ_{\max} [kPa]	Δx [mm]
Koe 1	50	30,32	1,8
Koe 2	100	60,05	2,4
Koe 3	150	86,06	3,2

Taulukko 6.7. Maan ja putken pituussuuntaisen koesarjan koenäytteiden vesipitoisuudet, alkuperäiset irtotiheydet ja kuvairtitiheydet kokeen alussa.

Koe	ρ [kg/m ³]	ρ_d [kg/m ³]	w [%]
Koe 1	1900	1810	4,74
Koe 2	1920	1800	6,09
Koe 3	1900	1800	5,23



Kuva 6.14. Maan ja putken pituussuuntaisen koesarjan leikkausjännitys-normaalijännityskuvaaja.

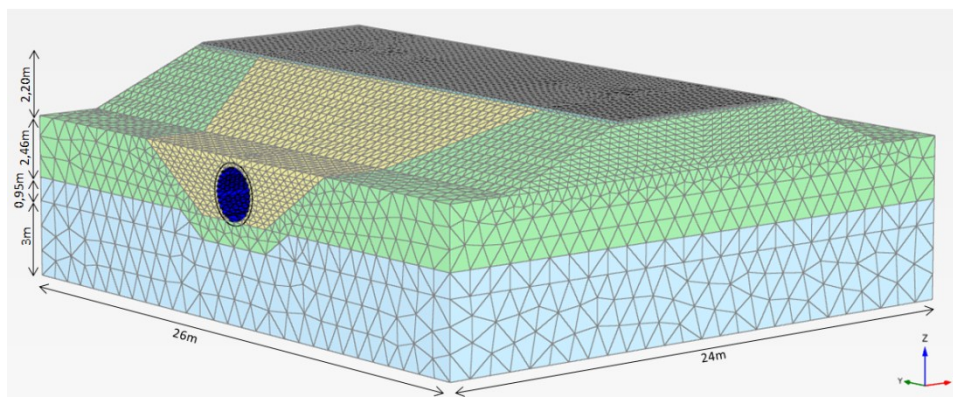
Maan ja putken suuntaisen koesarjan kitkakulmaksi saatiin $30,27^\circ$. Putken pinnan kitkakertoimeksi saatiin putken suunnassa 0,58. Koesarjan leikkausjännityksen maksimi arvojen väliseksi korrelaatiokertoimeksi saatiin 0,9959, joten kokeiden välinen lineaarinen riippuvuus on suuri.

7 Koekohteen laskennallinen analyysi

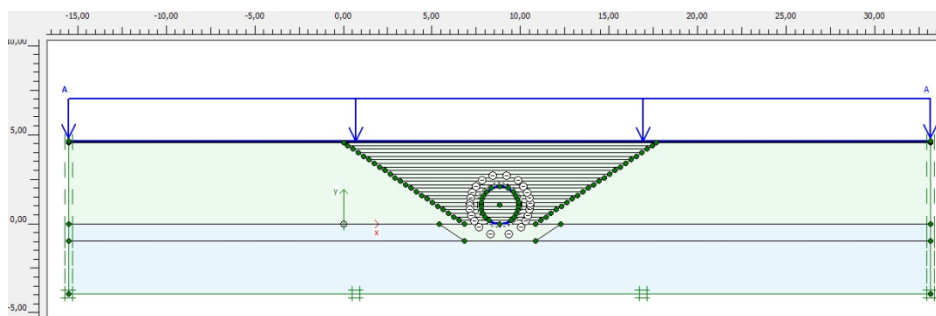
7.1 Laskentamalli ja lähtötiedot

Koekohteen laskennallinen analyysi suoritettiin Plaxis 2D ja Plaxis 3D ohjelmilla. Plaxis 2D ohjelmassa käytettiin tasogeometria mallia. Kuormitusotaksumina käytettiin maan omasta painosta aiheutuvaa staattista kuormitusta ja lyhytaikaisesta liikennekuormasta aiheutuvaa syklistä kuormitusta. Kummassakin ohjelmassa asfalttikerros ja putki mallinnettiin lineaarielastisena, sitomattomille kerroksille käytettiin hardening soil -materiaalimallia ja pohjamaalle käytettiin Mohr-Coulomb -materiaalimallia.

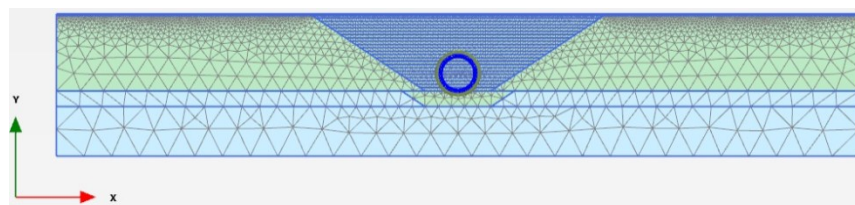
Mallinnuksen helpottamiseksi Plaxis 3D:ssä putki mallinnettiin 87,3 asteen sijaan kohtisuoraan tielinjaan nähden sekä kummassakin ohjelmassa jokainen rakennekerros oletettiin tasaiseksi ja tasalaatuiseksi. Pohjamaa mallinnettiin 3,95 m paksuisena kerroksena lukuun ottamatta putken kohtaa, jossa pohjamaan paksuudeksi jäi kolme metriä putken alle mallinnetun 0,95 m paksuisen murskearinan vuoksi. Plaxis 3D:ssä pohjamaan päälle mallinnettiin mursketäyttö 2,46 m paksuisesta putkea ympäröivästä osasta ja 2,09 m paksuisesta luiskatusta osasta. Kummassakin ohjelmassa mursketäytön päälle mallinnettiin 0,06 m paksuinen kantava asfalttibetoni kerros ja 0,05 m paksuinen asfalttibetoni kerros. Putkikaivanto mallinnettiin 0,2 m paksuisena kerroksina ja kaivannon seinät mallinnettiin 1:1,5 kaltevuuteen. Plaxis 3D:ssä luiskattu murske osa mallinnettiin 1:2 kaltevuuteen. Plaxis 2D:ssä mallinnus tehtiin 15-solmuisilla kolmioelementeillä. Kuvassa 7.1 on esitetty Plaxis 3D mallin geometria ja elementtiverkko sekä kuvissa 7.2 ja 7.3 on esitetty Plaxis 2D mallin geometria ja elementtiverkko.



Kuva 7.1. Plaxis 3D:n geometria ja elementtiverkko.



Kuva 7.2. Plaxis 2D:n geometria.



Kuva 7.3. Plaxis 2D:n elementtiverkko.

Plaxis 2D:ssä ja Plaxis 3D:ssä kuorma-autot mallinnettiin staattisena Plaxis ohjelman rajoitteiden takia. Kuorma-autojen akseliväleinä käytettiin alaluvussa 5.5.3 esitettyjä akselivälejä. Plaxis 3D mallissa kuorma-autojen akselikuormat mallinnettiin pyörän ja tienpinnan välisinä kosketuspinta-alojen kokoisina pintakuormina. Plaxis 2D mallissa akselikuormien aiheuttama pintakuormat mallinnettiin redusoituna pintakuormana, jossa kosketuspinta-alan pituustasoa vastaan kohtisuorassa suunnassa oletettiin metrin pituiseksi. Pintakuormat mallinnettiin Plaxis 3D mallissa *plate*- ja *interface*- elementtien avulla, sillä Riikosen diplomityössä (Riikonen 2014, s. 89) todettiin pintakuorman aiheuttavan epärealistisen jännitystilän ilman *plate*- ja *interface*-elementtejä. Kuorma-autojen aiheuttamat pintakuormat laskettiin taulukoiden 5.10 ja 5.11 esitetystä akselikuormien arvoista. Mallintamisen helpottamiseksi paripyörien kosketuspinnat mallinnettiin yhtenä kosketuspinta-alana. Koekuormituksen aikana kuorma-autojen renkaiden aiheuttamaa kosketuspinta-alaa ei määritetty, joten kosketuspinta-alat arvioitiin rengaspaineen ja rengaskuorman avulla liitteessä 6 esitettyjen VTT:n HVS -kokeiden yhteydessä määritettyjen tulosten perusteella. Taulukoissa 7.1-7.4 on esitetty Plaxis 2D ja Plaxis 3D malleissa käytetyt kosketuspinta-alat ja kosketuspaineet.

Taulukko 7.1. Neliakselisen kuorma-auton kosketuspaineet Plaxis 2D:ssä.

2D: 4-aks. auto	1-aks	2-aks	3-aks	4-aks
Pyöräkuorma [kN]	39,16	36,25	51,54	42,60
Pyörän leveys [m]	0,245	0,243	0,293	0,273
Pyörän pituus [m]	1,000	1,000	1,000	1,000
Pinta-ala [m ²]	0,245	0,243	0,293	0,273
Kosketuspaine kN/m ²	159,85	149,19	175,89	156,03

Taulukko 7.2. Kolmiakselisen kuorma-auton kosketuspaineet Plaxis 2D:ssä.

2D: 3-aks. auto	1-aks	2-aks	3-aks
Pyöräkuorma [kN]	40,76	54,51	39,06
Pyörän leveys [m]	0,245	0,300	0,271
Pyörän pituus [m]	1,000	1,000	1,000
Pinta-ala [m ²]	0,245	0,300	0,271
Kosketuspaine kN/m ²	166,39	181,70	144,15

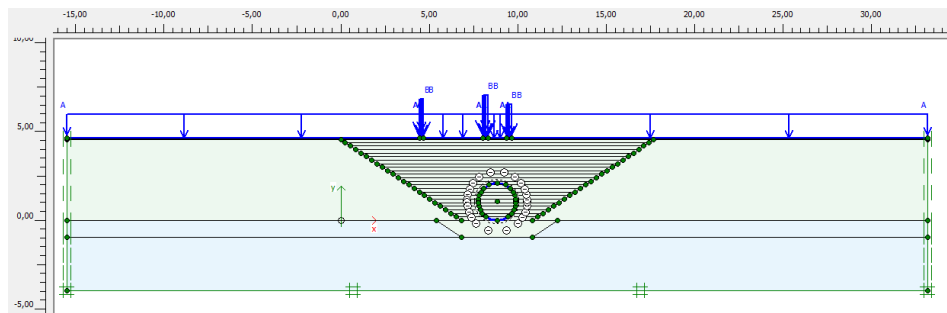
Taulukko 7.3. Neliakselisen kuorma-auton kosketuspaineet Plaxis 3D:ssä.

3D: 4-aks. auto	1-aks	2-aks	3-aks	4-aks
Pyöräkuorma [kN]	39,163	36,253	51,536	42,595
Pyörän leveys [m]	0,245	0,243	0,293	0,273
Pyörän pituus [m]	0,245	0,243	0,293	0,273
Pinta-ala [m ²]	0,0600	0,0590	0,0858	0,0745
Kosketuspaine kN/m ²	652,44	613,95	600,31	571,52

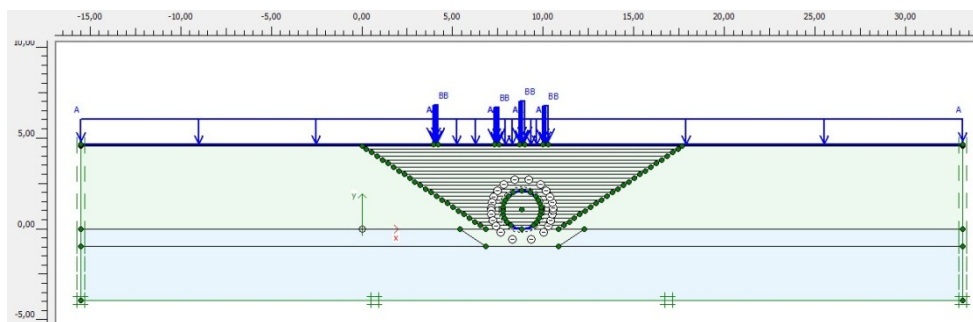
Taulukko 7.4. Kolmiakselisen kuorma-auton kosketuspaineet Plaxis 2D:ssä.

3D: 3-aks. auto	1-aks	2-aks	3-aks
Pyöräkuorma [kN]	40,764	54,511	39,065
Pyörän leveys [m]	0,245	0,300	0,271
Pyörän pituus [m]	0,245	0,300	0,271
Pinta-ala [m ²]	0,060	0,090	0,073
Kosketuspaine kN/m ²	679,12	605,67	531,92

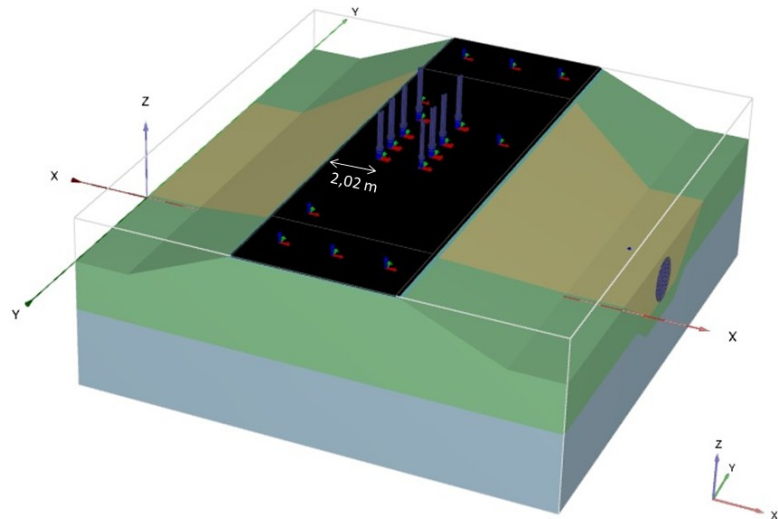
Kummassakin ohjelmassa kolmiakselisen kuorma-auton pintakuormat sijoitettiin malliin siten, että taka-akselien pintakuormien keskipisteet sijaitsivat 0,675 m päässä putken laki pisteen linjasta. Neliakselisen kuorma-auton pintakuormat sijoitettiin siten että kolmesta taka-akselista keskimäinen sijaitsi suoraan putken lakipisteen päällä. Plaxis 3D:ssä kuorma-autot sijoitettiin tien leveyssuunnassa 2,02 m päähän toisesta mallinnetusta tien reunasta. Kuvissa 7.4 ja 7.5 on esitetty Plaxis 2D mallissa kolmi- ja neliakselisen kuorma-autojen pintakuormien sijainti ja kuvassa 7.6 on esitetty esimerkkinä neliakselisen kuorma-auton pintakuormien sijainti Plaxis 3D:ssä.



Kuva 7.4. Kolmiakselisen kuorma-auton pintakuormien sijainti Plaxis 2D mallissa.



Kuva 7.5. Neliakselisen kuorma-auton pintakuormien sijainti Plaxis 2D mallissa.



Kuva 7.6. Neliakselisen kuorma-auton pintakuormien sijainti Plaxis 3D:ssä.

Koekohteen alkuperäisen ja uuden murskekerroksien muodonmuutosominaisuudet eivät olleet tiedossa eikä tämän työn puitteissa niitä lähdetty kokeellisesti määrittämään, joten muodonmuutosmoduulien suuruusluokka jouduttiin määrittämään rakeisuudeltaan vastaavanlaisille materiaaleille tehdyistä kolmiakσιαaliskokeiden tulosten perusteella. Muodonmuutosmoduulin suuruusluokka määritettiin tielaitoksen *Sitomattomien kerrostien kiviainesten muodonmuutosominaisuudet* (1993) –tutkimusprojektin yhteydessä suoritetuista staattisista kolmiakσιαaliskokeiden tuloksista, joissa kalliomurskeen raekoko oli 0–60 mm. Syklisen muodonmuutosmoduulin arvona käytettiin 20 prosenttia suurempaa arvoa kuin staattisessa laskennassa. Tämä oletus perustuu professori Kolisojan kokemukseen perustuvaan arvioon (Kolisoja 2014). Plaxis ohjelmaa varten sekanttimoduuli E_{50} muunnettiin E_{50}^{ref} arvoksi kaavalla (7.1), jossa käytettiin arvoja $c = 0$ kPa, $\sigma_3' = 50$ kPa, $p^{ref} = 100$ kPa ja $\varphi = 48,4^\circ$ (Brinkgreve ym. 2011d, s.50)

$$E_{50}^{ref} = E_{50} \cdot \left(\frac{p^{ref} + c \cdot \cot(\varphi)}{\sigma_3' + c \cdot \cot(\varphi)} \right)^m \quad (7.1)$$

missä c on koheesio (kPa)
 σ_3' on tehokas vaakajännitys (kPa)
 φ on maan sisäinen kitkakulma ($^\circ$)
 p^{ref} on referenssi jännitys (kPa)
 E_{50} on avoimella kolmiakσιαaliskokeella määritetty sekanttimoduuli (kPa)
 m on jännityseksponentti (-).

Putken ympärystäytön kitkakulma, tilavuuspaino sekä murskeen ja putken välinen kitkakulman suuruus määritettiin lujuuskokeilla (luku 6). Putken ja murskeen välisen kontaktin suuruutta kuvaavan *interface* arvo on laskettu putken säteen suuntaisen kitkakulman ja murskeen kitkakulman suhteena. Laskennallisesta syystä murskeen koheesioksi valittiin 2 kPa, jolloin estettiin penkereen sortuminen luiskan yläpäässä. Pohjamaan kimmomoduulin arvo valittiin niin suureksi, että putken painuma pohjamaahan rajoittui muutaman millimetriin. Putken materiaaliparametreina käytettiin valmistajan sivuilta saatavia arvoja lukuun ottamatta putken kimmomoduulia kehän suunnassa, joka määritettiin valmistajan toimittamista renkasjäykkyyskokeen tuloksista.

Asfalttikerroksien kimmokertoimien suuruudet määritettiin Tiehallinnon *Tietoa tien suunnitteluun 71D* (Tiehallinto 2005) julkaisussa esitetyillä kaavoilla. Ajoneuvon no-

peutena kaavoissa käytettiin 60 km/h, joka on koekohteen tiellä sallittu nopeusrajoitus. Asfaltin lämpötilaa ei koekuormituksen aikana mitattu, joten lämpötilana käytettiin liikenneviraston tiesääaseman vt25 Karjaa mittaamia asfaltin lämpötiloja. Tiesääaseman havainnot haettiin ilmatieteenlaitoksen avoimesta datapalvelusta, joka on kaikille käytettävissä osoitteessa <https://ilmatieteenlaitos.fi/avo-in-data>. Tieaseman havaintojen perusteella asfaltin lämpötila oli 9.4.2014 suoritettujen koekuormitusten aikana noin +22 astetta. Taulukossa 7.5 on esitetty asfalttibetonin AB (BIT50/70) ja kantavan asfalttibetonin ABK (BIT50/70) kimmomoduulien laskentakaavat sekä taulukossa 7.6 on esitetty kaavat materiaalien moduulien lämpötila ja kuormitusaikakorjauksiin. Taulukoissa 7.7 ja 7.8 on esitetty laskelmissa käytetyt kaikki materiaaliparametrit.

Taulukko 7.5. Asfalttibetonin ja kantavan asfalttibetonin kimmomoduulien laskentakaavat. (Tiehallinto 2005, s. 7)

Materiaali	E-moduuli, MPa
Asfalttibetoni (BIT50/70)	$4175 \cdot f(T) \cdot f_1(V)$
Kantava asfalttibetoni (BIT50/70)	$4315 \cdot f(T) \cdot f_1(V)$

Taulukko 7.6. kaavat materiaalien lämpötila- ja kuormitusaikakorjauksiin. (Tiehallinto 2005, s. 8)

Lämpötila- ja kuormitusaikafunktio	Kaava
$f(T)$	$0,002 \cdot T^2 - 0,1583 \cdot T + 3,366$
$f_1(V)$	$0,2424 \cdot V^{0,3461}$

Taulukko 7.7. Staattisen laskelman materiaaliparametrit.

	Staattiset arvot							
	2D/3D					3D	2D	3D
	AB	ABK	Uusi täyttö	Pohjamaa	Vanha täyttö	Plate-elementti	Putki	Putki
Malli	LE	LE	HS	MC	HS	-	LE	LE
Tila	Drained	Drained	Drained	Drained	Drained	-	-	-
γ (kN/m ³)	24,0	26,7	20,5	26,4	20,5	-	-	21,0
W (kN/m/m)	-	-	-	-	-	-	0,504	-
ϕ (°)	-	-	48,4	30	40	-	-	-
ψ (°)	-	-	18,4	0	10	-	-	-
ν	0,30	0,30	-	0,35	-	0,495	0,30	0,30
c (kPa)	-	-	2	4	2	-	-	-
E_t (MPa)	3554	3673	-	120	-	1000	11946	11946
E_{ur}^{ref} (MPa)	-	-	622,254 ¹⁾	-	480,832 ¹⁾	-	-	-
E_{oed}^{ref} (MPa)	-	-	229,177 ²⁾	-	237,592 ²⁾	-	-	-
E_{50}^{ref} (MPa)	-	-	311,127	-	240,416	-	-	-
E_{50} (MPa)	-	-	220	-	170	-	-	-
m	-	-	0,5	-	0,5	-	-	-
K_0	Automatic	Automatic	0,255 ²⁾	Automatic	0,361 ²⁾	-	-	-
interface	-	-	0,583	-	-	-	-	-
A (m ²)	-	-	-	-	-	-	0,047	-
E_p (MPa)	-	-	-	-	-	-	12000	-
$E_p A$ (MN)	-	-	-	-	-	-	564	-
I (m ⁴)	-	-	-	-	-	-	8,7E-06	-
EI (kNm ²)	-	-	-	-	-	-	103,36	-
d (mm)	-	-	-	-	-	0,01	47	47
r (mm)	-	-	-	-	-	-	1057	1057
1) $2 \cdot E_{50}^{ref}$								
2) iteroitu Plaxiksen reunaehtojen mukaisiksi								

Taulukko 7.8. Syklisen laskelman materiaaliparametrit.

	Sykliset arvot							
	2D/3D					3D	2D	3D
	AB	ABK	Uusi täyttö	Pohjamaa	Vanha täyttö	Plate-elementti	Putki	Putki
Malli	LE	LE	HS	MC	HS	-	LE	LE
Tila	Drained	Drained	Drained	Drained	Drained	-	-	-
γ (kN/m ³)	24,0	26,7	20,5	26,4	20,5	-	-	21,0
W (kN/m/m)	-	-	-	-	-	-	0,504	-
ϕ (°)	-	-	48,4	30,0	40,0	-	-	-
ψ (°)	-	-	18,4	0,0	10,0	-	-	-
ν	0,30	0,30	-	0,35	-	0,495	0,30	0,30
c (kPa)	-	-	2	4	2	-	-	-
E_t (MPa)	3554	3673	-	120	-	1000	11946	11946
E_{ur}^{ref} (MPa)	-	-	746,704 ¹⁾	-	576,998 ¹⁾	-	-	-
E_{oed}^{ref} (MPa)	-	-	275,012 ²⁾	-	340,159 ²⁾	-	-	-
E_{50}^{ref} (MPa)	-	-	373,352	-	288,499	-	-	-
E_{50} (MPa)	-	-	264	-	204	-	-	-
m	-	-	0,5	-	0,5	-	-	-
K_0	Automatic	Automatic	0,254 ²⁾	Automatic	0,384 ²⁾	-	-	-
interface	-	-	0,583	-	-	-	-	-
A (m ²)	-	-	-	-	-	-	0,047	-
E_p (MPa)	-	-	-	-	-	-	12000	-
$E_p A$ (MN)	-	-	-	-	-	-	564	-
I (m ⁴)	-	-	-	-	-	-	8,7E-06	-
EI (kNm ²)	-	-	-	-	-	-	103,36	-
d (mm)	-	-	-	-	-	0,01	47	47
r (mm)	-	-	-	-	-	-	1057	1057
1) $2 * E_{50}^{ref}$								
2) iteroitu Plaxiksen reunaehtojen mukaisiksi								

7.2 Mallinnuksen kulku

Mallinnuksen kulku Plaxis 2D ja Plaxis 3D -mallissa ovat pääpiirteissään samanlaiset. Kummassakin ohjelmassa staattinen mallinnus eroaa syklisestä mallinnuksesta siten että staattisissa laskelmissa ei mallinnettu kuorma-autojen pintakuormia. Taulukossa 7.9 on esitetty mallinnusvaiheet ja taulukossa 7.10 mallinnusten laskentavaiheet.

Taulukko 7.9. Mallinnuksen vaiheet.

	2D	3D
1	Projekti tietojen syöttäminen kohdassa project properties	
2	Geometrian luonti geometry line- ja standard fixities -työkalulla	Geometrian luonti Borehole –työkalulla sekä surfaces ja extrude komentojen avulla.
3	Putken mallintamien tunnel -työkalulla	Putken mallintaminen cylinder komennolla sekä Plate- ja interface-elementin luominen
4	Materiaaliominaisuuksien määrittely. Parametrit on esitetty aluvussa 7.1	
5	Tiivistyskuorman määrittely. Käytettiin 100 kPa:n tasaista pinta-kuormaa.	
6	Kuormitus mallinnettiin distributed – työkalulla. Kuormat on esitetty aluvussa 7.1	Kuormitus mallinnettiin Plate- ja interface-elementeilla. Kuormat on esitetty luvussa 7.1
7	Elementtiverkon luominen. Elementtiverkon tiheytenä käytettiin very fine vaihtoehtoa.	
8	Laskentavaiheiden määrittely. Kuorma-autojen kuormitus mallinnettiin viitenä kuormituskertana, sillä Pihlajamäen diplomityössä (Pihlajamäki 2012, s. 41) todettiin jännitysten ja muodonmuutoksien muutos viiden toistokuormituksen jälkeen jäävän olemattoman pieneksi. Taulukossa 7.9 on esitetty laskentavaiheet. Staattisissa laskelmissa käytettiin laskentavaiheita 0-38.	
9	Laskenta	
10	Tarkastelupisteiden valinta. Plaxis Output –ohjelmassa ja mielenkiinnon kohteena olevien tulosten siirto Exceliin jatkokäsittelyä varten	

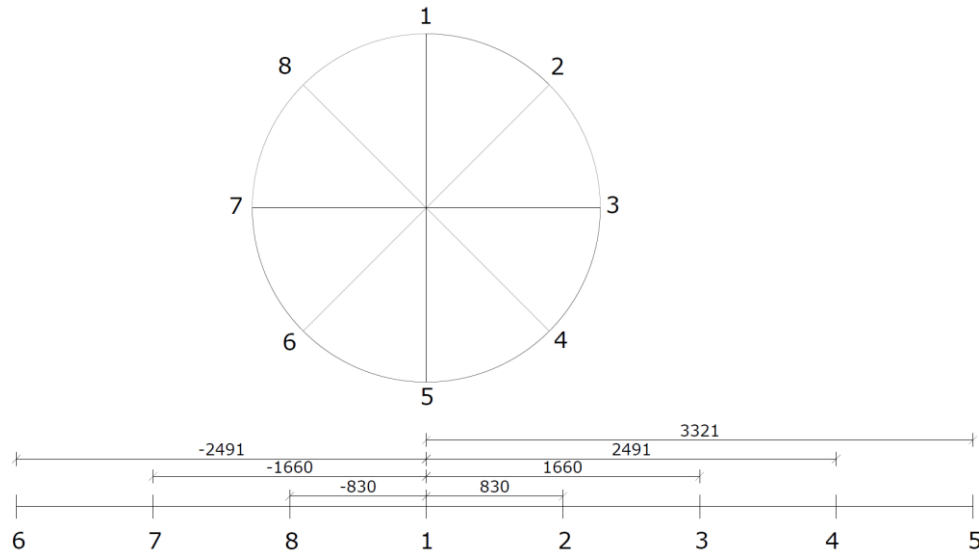
Taulukko 7.10. Mallinnusten laskentavaiheet.

Laskentavaiheet	Phase no.	Start from	Calculation	Loading input	Reset displacements to zero
Initial phase	0	N/A	K0 procedure	Unassigned	-
Alkupuperäinen penger	1	0	Plastic analysis	Staged constuction	YES
Tiivistäminen	2	1	Plastic analysis	Staged constuction	NO
Tiivistämisen vaikutus	3	2	Plastic analysis	Staged constuction	NO
Kaivuu 0,5m	4	3	Plastic analysis	Staged constuction	NO
Kaivuu 1,1m	5	4	Plastic analysis	Staged constuction	NO
Kaivuu 1,7m	6	5	Plastic analysis	Staged constuction	NO
Kaivuu 2,3m	7	6	Plastic analysis	Staged constuction	NO
Kaivuu 2,9m	8	7	Plastic analysis	Staged constuction	NO
Kaivuu 3,5m	9	8	Plastic analysis	Staged constuction	NO
Kaivuu 4,1m	10	9	Plastic analysis	Staged constuction	NO
Kaivuun lopetus 4,4m	11	10	Plastic analysis	Staged constuction	NO
Täyttö 0,2m	12	11	Plastic analysis	Staged constuction	YES
Täyttö 0,4m	13	12	Plastic analysis	Staged constuction	NO
Putken asennus	14	13	Plastic analysis	Staged constuction	NO
Täyttö 0,6m	15	14	Plastic analysis	Staged constuction	NO
Täyttö 0,8m	16	15	Plastic analysis	Staged constuction	NO
Täyttö 1,0m	17	16	Plastic analysis	Staged constuction	NO
Täyttö 1,2m	18	17	Plastic analysis	Staged constuction	NO
Täyttö 1,4m	19	18	Plastic analysis	Staged constuction	NO
Täyttö 1,6m	20	19	Plastic analysis	Staged constuction	NO
Täyttö 1,8m	21	20	Plastic analysis	Staged constuction	NO
Täyttö 2,0m	22	21	Plastic analysis	Staged constuction	NO
Täyttö 2,2m	23	22	Plastic analysis	Staged constuction	NO
Täyttö 2,4m	24	23	Plastic analysis	Staged constuction	NO
Täyttö 2,6m	25	24	Plastic analysis	Staged constuction	NO
Täyttö 2,8m	26	25	Plastic analysis	Staged constuction	NO
Täyttö 3,0m	27	26	Plastic analysis	Staged constuction	NO
Täyttö 3,2m	28	27	Plastic analysis	Staged constuction	NO
Täyttö 3,4m	29	28	Plastic analysis	Staged constuction	NO
Täyttö 3,6m	30	29	Plastic analysis	Staged constuction	NO
Täyttö 3,8m	31	30	Plastic analysis	Staged constuction	NO
Täyttö 4,0m	32	31	Plastic analysis	Staged constuction	NO
Täyttö 4,2m	33	32	Plastic analysis	Staged constuction	NO
Täyttö 4,4m	34	33	Plastic analysis	Staged constuction	NO
Täyttö 4,55m	35	34	Plastic analysis	Staged constuction	NO
ABK ja AB rakentaminen	36	35	Plastic analysis	Staged constuction	NO
Tiivistäminen	37	36	Plastic analysis	Staged constuction	NO
Tiivistämisen vaikutus	38	37	Plastic analysis	Staged constuction	NO
Ajoneuvo 1	39	38	Plastic analysis	Staged constuction	YES
Palautus 1	40	39	Plastic analysis	Staged constuction	NO
Ajoneuvo 2	41	40	Plastic analysis	Staged constuction	NO
Palautus 2	42	41	Plastic analysis	Staged constuction	NO
Ajoneuvo 3	43	42	Plastic analysis	Staged constuction	NO
Palautus 3	44	43	Plastic analysis	Staged constuction	NO
Ajoneuvo 4	45	44	Plastic analysis	Staged constuction	NO
Palautus 4	46	45	Plastic analysis	Staged constuction	NO
Ajoneuvo 5	47	46	Plastic analysis	Staged constuction	NO

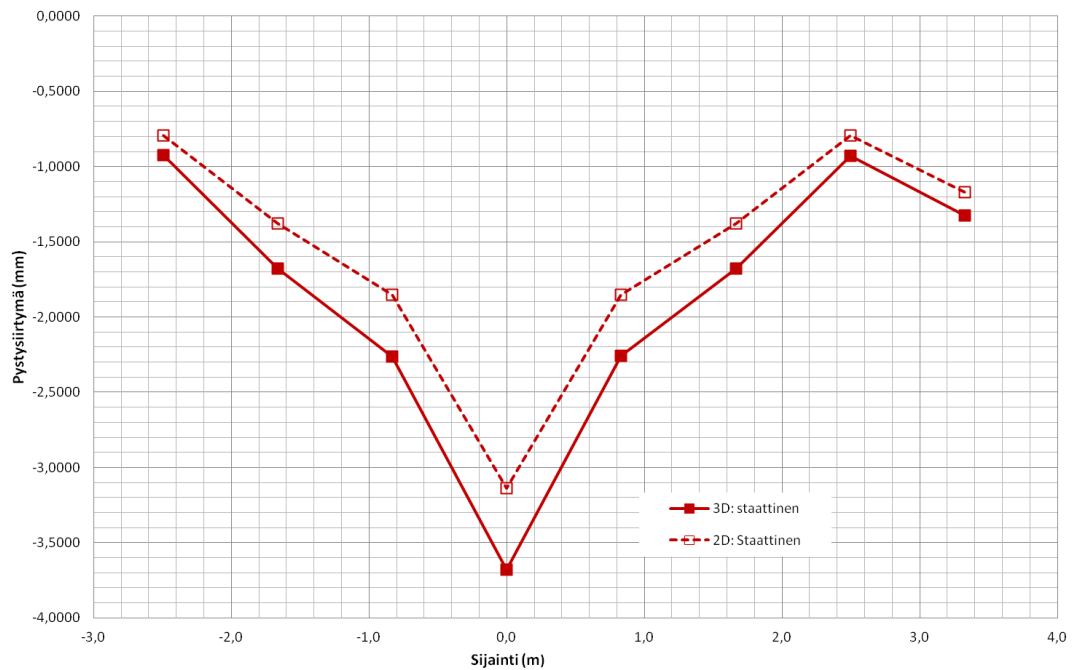
7.3 Tulokset

Plaxis 2D ja Plaxis 3D laskelmissa tarkasteltiin kuorma-autojen aiheuttamia pysty- ja vaakasiirtymiä sekä normaalivoiman ja taivutusmomentin suuruutta putkessa. Kummasakin ohjelmassa tarkastelupisteiksi valittiin kuvan 7.7 mukaiset pisteet. Plaxis 3D -mallissa tarkastelupisteiden poikkileikkauksen kohta valittiin staattisessa laskelmassa putken puolesta välistä sekä syklisissä laskelmissa kuorma-autojen akselivälin puolesta välistä (putken kohdasta 11,224 m) ja tiereunaa lähempänä olevien renkaiden alta (putken kohdasta 9,974m). Kuvissa 7.8-7.13 on esitetty Plaxis 2D ja Plaxis 3D laskelmien

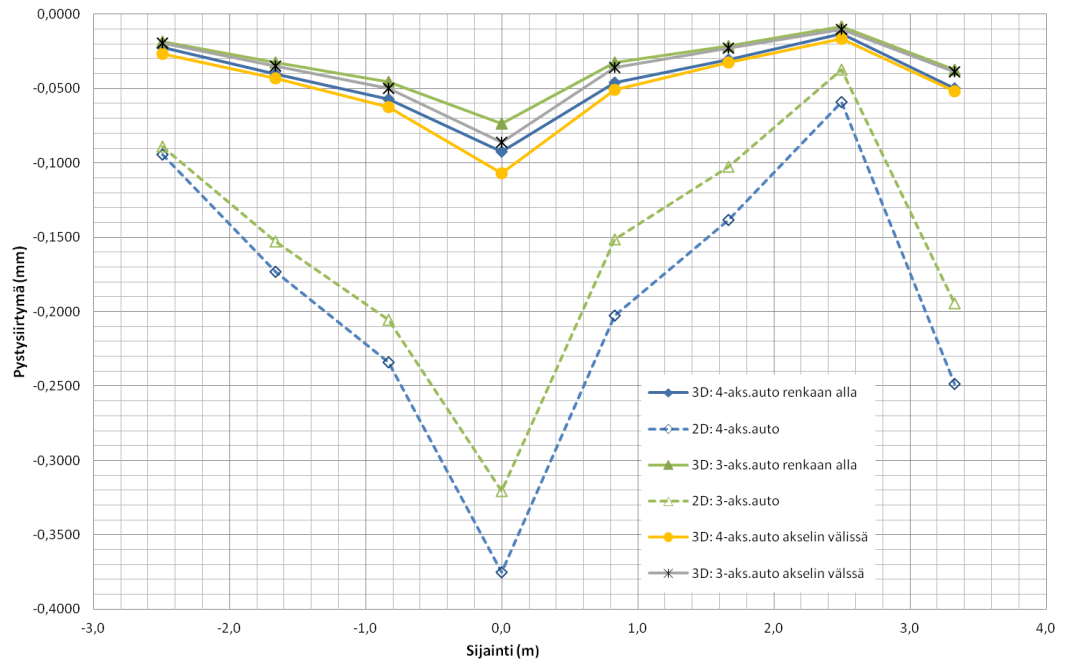
tulokset. Plaxis 2D -malli ilmoittaa vaakasiirtymän u_x ja momentin M etumerkit vastakkaismerkkisiksi kuin Plaxis 3D -malli. Kuvien 7.10, 7.11 ja 7.13 tuloksissa on otettu huomioon ohjelmien vastakkaismerkkisyys. Jotta pystysiirtymän u_y arvoja pystyttäisiin vertailemaan eri laskentatapauksien kesken, Kuvissa 7.8 ja 7.9 tarkastelupisteiden 1-4 ja 6-8 pystysiirtymän u_y arvoista on poistettu pisteen 5 vastaava u_y arvo.



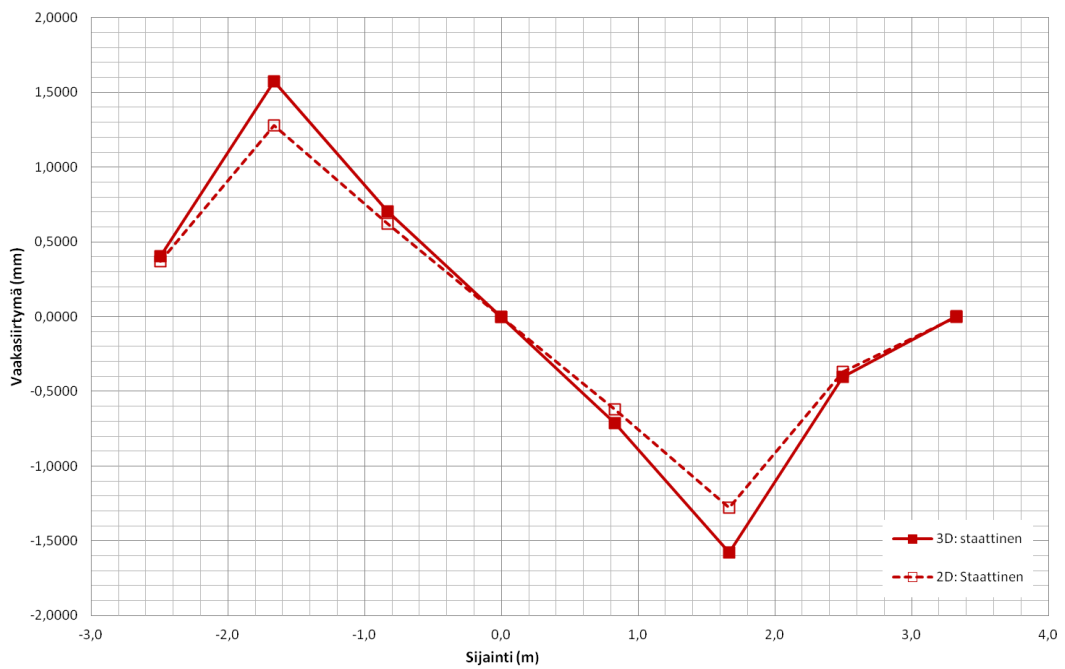
Kuva 7.7. Laskelmien tarkastelupisteet putkessa.



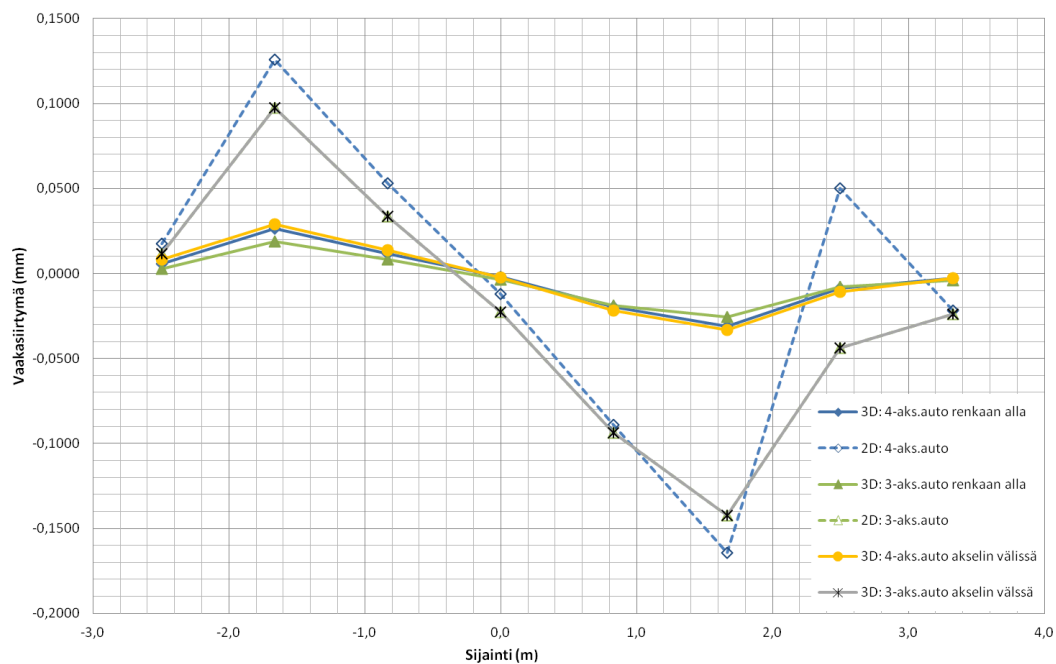
Kuva 7.8. Tarkastelupisteiden pystysiirtymät staattisissa laskelmissa.



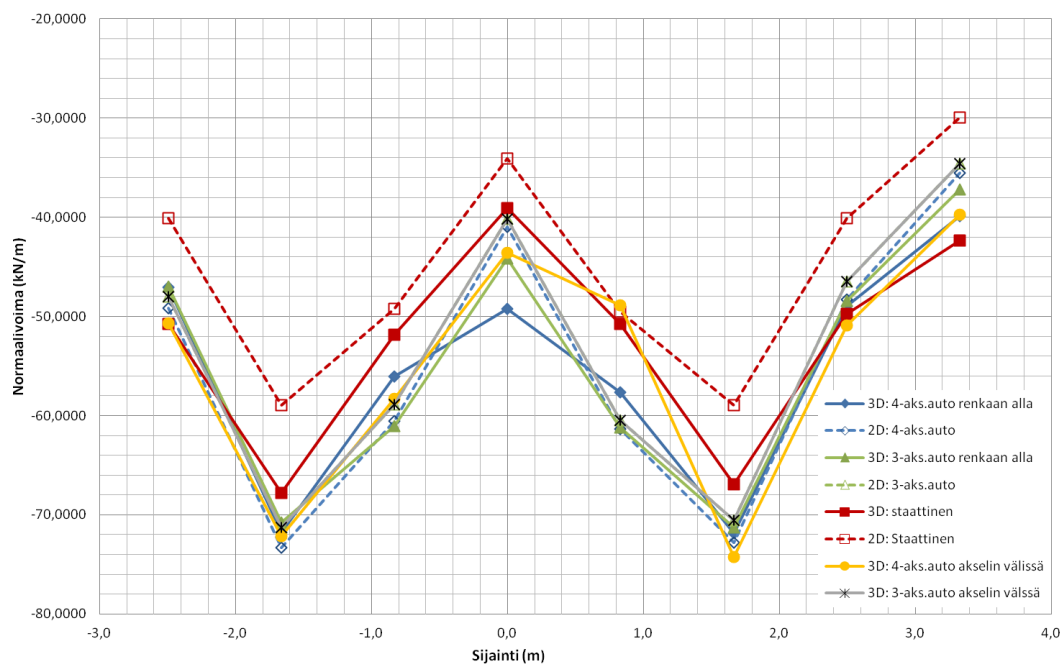
Kuva 7.9. Tarkastelupisteiden pystysiirtymät syklisissä laskelmissa.



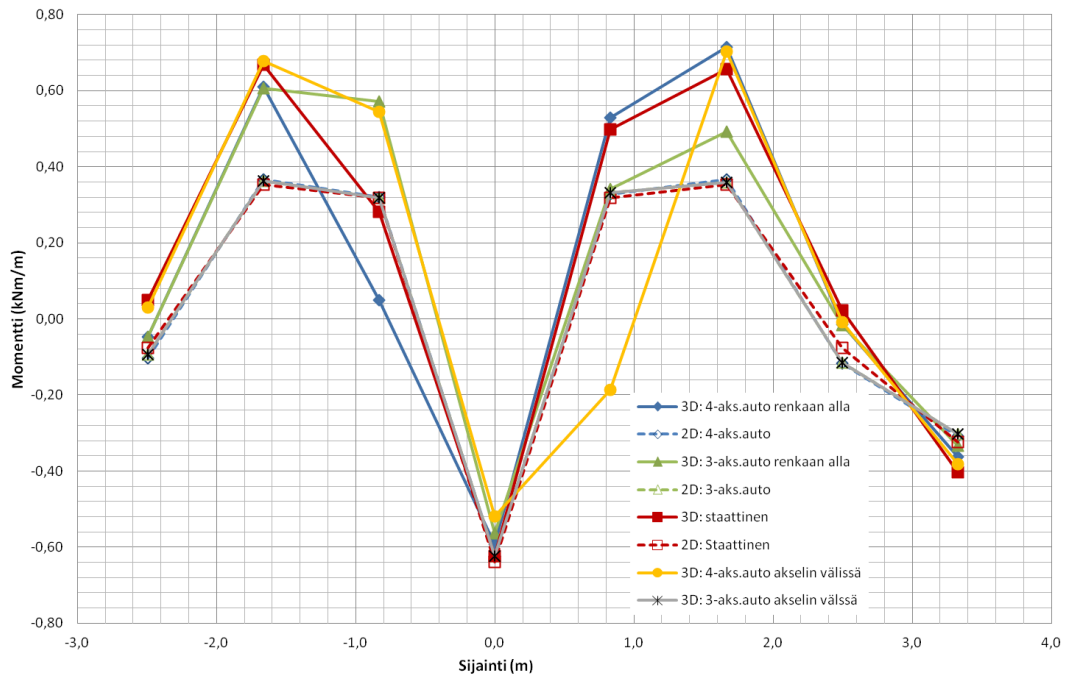
Kuva 7.10. Tarkastelupisteiden vaakasiirtymät staattisissa laskelmissa.



Kuva 7.11. Tarkastelupisteiden vaaka siirtymät syklisissä laskelmissa.



Kuva 7.12. Tarkastelupisteiden normaali voimat staattisissa ja syklisissä laskelmissa.



Kuva 7.13. Tarkastelupisteiden pystysiirtymät staattisissa ja syklisissä laskelmissa.

Staattisissa laskelmissa Plaxis 2D -malli laskee tarkastelupisteestä riippuen pystysiirtymät 11-18 % pienemmäksi sekä vaakasiirtymien osalta 8-19 % pienemmäksi pisteissä 6-8 ja 9-19% suuremmiksi pisteissä 2-4 kuin Plaxis 3D -malli. Vastaavasti normaali-voiman arvot ovat 3-29 % Plaxis 3D -mallin arvoja pienempiä. Plaxis 2D -malli arvio momentin minimi kohdissa (pisteissä 3 ja 7) noin 47 % pienemmäksi ja momentin maksimi kohdassa (pisteessä 1) noin 3 % suuremmaksi kuin Plaxis 3D -malli.

Syklisissä laskelmissa Plaxis 2D -malli laskee tarkastelupisteiden pystysiirtymät ja vaakasiirtymät moninkertaisesti suuremmaksi kuin Plaxis 3D -malli. Kokeellisesti putken laen (pisteen 1) pystysiirtymäksi saatiin keskimäärin noin 0,07 mm, joten Plaxis 2D yliarvioi näihin tuloksiin verrattuna pystysiirtymät huomattavasti suuremmiksi. Putken normaali-voiman osalta ohjelmat antavat suuruusluokaltaan samoja arvoja. Normaali-voiman suhteellinen poikkeama tarkastelupisteistä riippuen on 1-17 %. Momentin osalta Plaxis 2D -malli arvio momentin maksimi kohdassa (pisteessä 1) keskimäärin 13 % pienemmäksi ja momentin minimi kohdissa (pisteissä 3 ja 7) keskimäärin 1 % suuremmaksi kuin Plaxis 3D -malli.

Staattisissa laskelmissa ohjelmien tulokset vastaavat melko hyvin toisiaan ottamalla huomioon ohjelmien erilaiset laskentatavat. Syklisiin laskelmiin Plaxis 2D -malli ei selvästikään sovellu siirtymien yliarvioimisen vuoksi. Plaxis 2D -mallin hankaluutena on pintakuormien mallinnus sillä kaksiulotteisesta nimestä huolimatta Plaxis 2D -malli laskee kuormat kolmiulotteisesti, jolloin ohjelma olettaa kuorman jatkuvan laskentatasoa vastaan kohtisuorassa suunnassa (z-suunnassa). Tämä saattaa olla syynä Plaxis 2D -mallin laskemiin huomattavan suuriin pystysiirtymien arvoihin.

7.4 Herkkyysanalyysi ja niiden tulokset

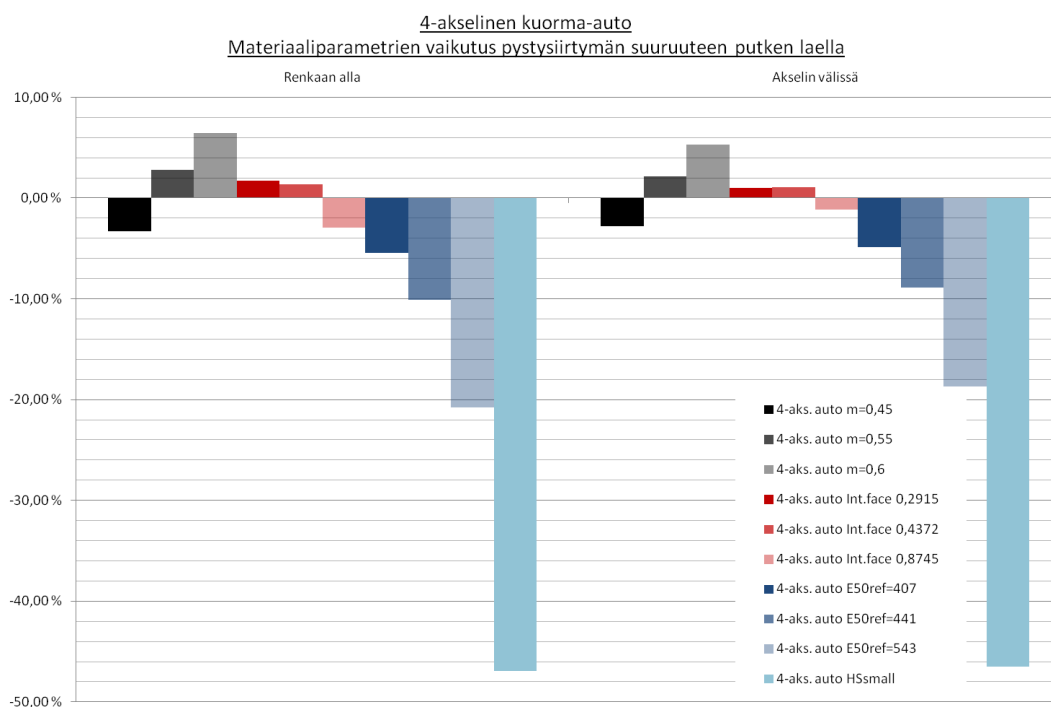
Koekohteen ympäristäytön muodonmuutosominaisuudet eivät olleet tiedossa, joten materiaaliparametrit jouduttiin arvioimaan mallinnusta varten. Tämän vuoksi tutkittiin eri materiaaliparametrien vaikutusta putken laen pystysuuntaisen siirtymän suuruuteen.

Tarkasteltaviksi materiaaliparametreiksi valittiin jännityseksponentti m , sekanttimoduuli E_{50}^{ref} sekä putken ja murskeen välisen kontaktin suuruutta kuvaavan *interface* arvo. Jännityseksponentti m kuvaa jännitys-muodonmuutoskäyrän muotoa. Käyrä muuttuu suoraksi, kun jännityseksponentti saa arvon 1. Jokaiselle materiaaliparametrille valittiin kolme arvoa pystysiirtymän tutkimiseksi. Lisäksi tutkittiin HSsmall -materiaalimallin vaikutusta pystysiirtymään suuruuteen. HSsmall –malliin tarvittavat parametrit G_0^{ref} ja parametri $\gamma_{0,7}$ määritettiin VTT:n HVS -tutkimuksen yhteydessä suoritettujen kolmiaksaalikokeiden tuloksien avulla sekä Plaxis ohjekirjan mukaisesti. Liitteessä 7 on esitetty HVS –tutkimuksessa saadut tulokset. Kaikki tarkastelut suoritettiin Neliakselisella kuorma-autolla. Kuvassa 7.14 on esitetty laskennoissa käytetyt materiaaliparametrit.

	4-akselisen kuorma-auto 3D HERKKYYSANALYYSI									
	Uusi täyttö $m=0,45$	Uusi täyttö $m=0,55$	Uusi täyttö $m=0,6$	Uusi täyttö $E_{50}^{ref}=407$	Uusi täyttö $E_{50}^{ref}=441$	Uusi täyttö $E_{50}^{ref}=543$	Uusi täyttö $interface=0,2915$	Uusi täyttö $interface=0,437$	Uusi täyttö $interface=0,875$	Uusi täyttö Hsmall
Malli	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HS	HSsmall
γ (kN/m ³)	20,47	20,47	20,47	20,47	20,47	20,47	20,47	20,47	20,47	20,47
ϕ (°)	48,4	48,4	48,4	48,4	48,4	48,4	48,4	48,4	48,4	48,4
ψ (°)	18,4	18,4	18,4	18,4	18,4	18,4	18,4	18,4	18,4	18,4
c (kN/m ²)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
E_{ur}^{ref} (MPa)	721,270 ²⁾	773,038 ²⁾	800,299 ²⁾	814,586 ²⁾	882,470 ²⁾	1086,115 ²⁾	746,704 ²⁾	746,704 ²⁾	746,704 ²⁾	746,704 ²⁾
E_{oed}^{ref} (MPa)	275,565 ¹⁾	274,994 ¹⁾	275,533 ¹⁾	300,013 ¹⁾	325,015 ¹⁾	400,018 ¹⁾	275,012 ¹⁾	275,012 ¹⁾	275,012 ¹⁾	275,012 ¹⁾
E_{50}^{ref} MPa	360,635	386,519	400,150	407,293	441,235	543,058	373,352	373,352	373,352	373,352
m	0,45	0,55	0,6	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,5
K_0	0,254	0,255	0,255	0,254	0,254	0,254	0,254	0,254	0,254	0,254
interface	0,583	0,583	0,583	0,583	0,583	0,583	0,292	0,437	0,875	0,583
G_0^{ref} MPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1044 ³⁾
$\gamma_{0,7}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,00004 ³⁾
1) iteroitu Plaxisin reunaehtojen mukaisiksi										
2) $2 \cdot E_{50}^{ref}$										
3) laskettu Plaxisin ohjekirjan mukaisesti										

Kuva 7.14. Laskennoissa käytetyt materiaaliparametrit.

Kuvassa 7.15 on vertailtu eri parametreilla saatuja pystysiirtymän tuloksia alaluvussa 7.3 esitettyihin Plaxis 3D:n tuloksiin. Vertailu tehtiin sekä kuorma-auton renkaan alla että akselin välissä. Tulosten perusteella parametrien muutoksilla on hieman suurempi vaikutus renkaan alla kuin akselin välissä. Jännityseksponentin m kasvattaminen 0,5 arvosta 0,6 arvoon kasvattaa pystysiirtymän suuruutta renkaan alla 6,4 % ja vastaavasti parametrin m pienentäminen 0,5 arvosta 0,45 arvoon pienentää pystysiirtymän arvoa renkaan alla 3,3 %. Jännityseksponentin muuttaminen yksinään näyttää siis vaikuttavan pystysiirtymään varsin vähän. Vastaavasti *Interface* arvon pienentäminen 0,583 arvosta 0,2915 arvoon kasvattaa pystysiirtymää noin 1,7 % ja arvon kasvattaminen pienentää pystysiirtymää noin 3 %. Näin ollen maan ja putken välisellä kontaktin suuruudella ei tulosten perusteella ole merkittävää vaikutusta putken pystysiirtymään. Jäykkyysparametrin E_{50}^{ref} kasvattaminen pienentää pystysiirtymää suhteellisen paljon. Parametrin E_{50}^{ref} kasvattaminen noin 18 %:lla pienentää pystysiirtymää renkaalla noin 10 % ja akselin välissä noin 9 %. Vastaavasti E_{50}^{ref} kasvattaminen 43 % pienentää pystysiirtymää renkaan alla noin 21 % ja akselin välissä noin 19 %. Kuvan 7.15 perusteella HSsmall-materiaalimallin vaikutus on kaikista suurin ja vaikutusta pystysiirtymään voidaan pitää erittäin merkittävänä. On kuitenkin huomioitava, että HSsmall –mallin tulos on vain suuntaa antava, sillä parametrit G_0^{ref} ja $\gamma_{0,7}$ on määritetty eri kolmiaksaalikokeiden tuloksista kuin jäykkyysparametri E_{50}^{ref} . Kuvan 7.15 tulosten perusteella laskennan luotettavuus määräytyy mallinnuksessa käytettävistä materiaaliparametreista sekä käytetystä materiaalimallista.



Kuva 7.15. Parametrien vaikutus pystysiirtymän suuruuteen.

8 Tulosten vertailu ja analysointi

8.1 Tulosten luotettavuus

Mittaustulosten ja laskennallisten tulosten vertailussa on aina otettava huomioon epävarmuustekijät, jotka vaikuttavat tulosten luotettavuuteen. Mittaustuloksien luotettavuuteen vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa mittausjärjestelyt, mittauslaitteiden ominaisuudet ja mittausympäristö. Joidenkin epävarmuustekijöiden tarkkaa suuruutta ei tunneta, joten niiden vaikutusta mittaustulokseen on vaikea arvioida.

Mittausjärjestelyissä aiheutuu epävarmuutta siirtymäantureiden sekä venymäliuskojen sijainti- ja kohtisuoruuspoikkeamista. Mittauksissa käytettiin kalibroitujen siirtymäantureita, joiden mittaustarkkuus on 0,7 %. Venymäliuskat ovat herkkiä ulkopuoliselle tärinälle sekä lämpötilan muutokselle. Putken mittaustapahtuma oli hetkittäinen, joten lämpötila voidaan olettaa pysyneen vakiona mittauksen aika. Putken kuormittamiseen käytettiin kuorma-autoja, jotka aiheuttivat tärinää tarkasteltavaan putkeen. Mitatut venymät olivat erittäin pieniä varsinkin putken pituussuunnassa, joten tärinän vaikutus mittaustuloksiin voidaan pitää suurena. Mitattuihin tuloksiin vaikutti lisäksi missä linjassa ja kuinka tarkasti kuorma-autot ajoivat tiehen merkityn viivan päältä. Kuvien 5.16 ja 5.17 mittaustuloksissa näkyy ajolinjan vaikutus hajonnan suuruutena. Tiedonkeruulaitteiden mittausnopeutena käytettiin 300 mittausta sekunnissa. Tämä tarkoittaa, että kuorma-auton nopeuden ollessa 20 km/h peräkkäin rekisteröityjen vasteiden välinen etäisyys tiepinnan suhteen tarkasteltuna on noin 18 mm. Vastaavasti 80 km/h nopeudella peräkkäisten vasteiden välinen etäisyys on 74 mm. Käytettyä mittausnopeutta voidaan pitää riittävän suurena putken suuren peitesyvyyden takia.

Laskennallisten tulosten luotettavuuteen vaikuttavat mallinnuksessa tehdyt yksinkertaistukset ja oletukset. Yksinkertaistukset ja oletukset tehtiin mallinnuksen helpottamiseksi sekä ohjelman rajoitteiden ja lähtötietojen puuttumisen takia. Kuorma-autojen renkaiden kosketuspinta-alat jouduttiin arvioimaan paripyörille ja super single –pyörille tehtyjen mittaustulosten perusteella. Mallintamisen helpottamiseksi Plaxis 3D:ssä putki mallinnettiin tielinjaan nähden kohtisuorasti, vaikka todellisuudessa putki asennettiin 87,3 asteen kulmassa tielinjaa nähden. Näillä ei ole kuitenkaan merkittävää vaikutusta mallinnuksessa saatuihin tuloksiin, sillä tarkasteltava putki sijaitsee yli 2,3 m syvyydessä tien pinnasta, joten tierakenteeseen kohdistuvat kuormitukset kerkeävät tasoittumaan ennen tarkasteltavaa putkea. Lisäksi kuorma-autot jouduttiin mallintamaan staattisena ohjelman rajoitteiden takia. Todellisuudessa tierakenteen epätasaisuudet, kuorma-auton nopeus ja massa sekä kuorma-auton tekniset ominaisuudet aiheuttavat tierakenteeseen dynaamisia kuormituksia. Kuitenkin mallinnuksen kannalta merkittävin luotettavuuteen vaikuttava tekijä on mursketäytöille käytetyt jäykkyysparametrit. Koekohteessa käytetyille murskeille ei ollut tiedossa muodonmuutosominaisuuksia, joten jäykkyysparametrit jouduttiin arvioimaan rakeisuudeltaan vastaavanlaisille materiaaleille tehdyistä kolmiaksaalikokeiden tulosten perusteella.

8.2 Laskennallisten arvojen ja mittaustulosten vertailu ja analysointi

Tulosten vertailuun valittiin mittaustuloksista 60 km/h nopeudella mitatut tulokset, sillä mallinnuksessa asfalttikerrosten kimmokertoimet määritettiin kyseisellä nopeudella. Vertailupisteeksi valittiin putken lakipiste, sillä putken pystysiirtymän arvo on suurim-

millaan putken lakipisteessä. Taulukossa 8.1 on vertailtu putken laen pystysiirtymän mittaustuloksia niitä vastaaviin Plaxis 3D:ssä Hardening soil -mallilla laskennallisesti määritettyihin arvoihin. Vertailu tehtiin sekä kuorma-auton renkaan alla että akselivälin keskellä. Taulukossa 8.2 on vertailtu HSsmall -mallilla laskennallisesti määritettyjä pystysiirtymän arvoja niitä vastaaviin mittaustuloksien arvoihin. Taulukossa 8.1 ja taulukossa 8.2 tunnuksen edessä kirjain R tarkoittaa renkaan alla mitattua tai laskettua arvoa ja kirjan A vastaavasti tarkoittaa akselin välissä mitattuja tai laskettuja arvoja. Kirjaimen jälkeinen numero tarkoittaa kuorma-auton tyyppiä. Numero 4 tarkoittaa neliakselista kuorma-autoa ja numero 3 vastaavasti kolmiakselista kuorma-autoa. Pisteen jälkeen numero tarkoittaa mittauskertaa.

Taulukko 8.1. Mittaustuloksien ja Hardening soil -mallin laskennallisten tulosten vertailu putken laen pystysiirtymän suhteen.

Tunnus	Pystysiirtymä [mm]		Suhteellinen poikkeama
	Koetulos	Laskennallinen arvo	
R4.1	0,0680	0,0923	-26 %
R4.2	0,0677	0,0923	-27 %
R4.3	0,0690	0,0923	-25 %
A4.1	0,0731	0,1067	-31 %
A4.2	0,0727	0,1067	-32 %
A4.3	0,0751	0,1067	-30 %
R3.1	0,0526	0,0736	-29 %
R3.2	0,0529	0,0736	-28 %
R3.3	0,0549	0,0736	-25 %
A3.1	0,0530	0,0859	-38 %
A3.2	0,0594	0,0859	-31 %
A3.3	0,0530	0,0859	-38 %

Taulukko 8.2. Mittaustuloksien ja HSsmall-mallin laskennallisten tulosten vertailu putken laen pystysiirtymän suhteen.

Tunnus	Pystysiirtymä [mm]		Suhteellinen poikkeama
	Laskennallinen tulos	Koetulos	
R4.1	0,0490	0,0680	-28 %
R4.2	0,0490	0,0677	-28 %
R4.3	0,0490	0,0690	-29 %
A4.1	0,0571	0,0731	-22 %
A4.2	0,0571	0,0727	-21 %
A4.3	0,0571	0,0751	-24 %

Taulukon 8.1 perusteella neliakselisen kuorma-auton renkaan alla mitatut arvot ovat keskimäärin 26 % pienempiä ja akselin välissä 31 % pienempiä kuin laskennalliset arvot. Vastaavasti kolmiakselisen kuorma-auton renkaan alla mitatut arvot ovat keskimäärin noin 27 % pienempiä ja akselin välissä noin 36 % pienempiä kuin laskennalliset arvot. Taulukossa 8.1 neliakselisen kuorma-auton mittaustulosten suhteellinen hajonta renkaan alla on 1,8 % ja akselivälin alla 1 %. Vastaavasti kolmiakselisen kuorma-auton mittaustulosten suhteellinen hajonta renkaan alla on 6,7 % ja akselivälin alla 2,3 %. Mittaustulosten sisäinen vaihtelu on siis varsin pientä ottaen huomioon kaikki mittaus- tuloksiin vaikuttavat epävarmuustekijät. Mittaustuloksia voidaan pitää näin ollen varsin

luotettavina. Taulukossa 8.1 mittaustulosten ja laskennallisten tulosten välinen poikkeama johtuu siis suurimmaksi osaksi laskentamallista ja laskentamallissa käytetyistä parametreista. Laskentoja varten materiaalien jäykkyysparametrit jouduttiin arvioimaan, joten jäykkyysparametrien arvioitu suuruusluokka aiheuttaa suurta epävarmuutta tuloksiin. Laskennoissa käytettiin Hardening soil –materiaalimallia, joka ei ota huomioon maan jäykkyyden kasvua hyvin pienillä muodonmuutoksen arvoilla. Koekohteen suuren peitesyvyyden ja hyvin tiivistetyn mursketäytön takia putkessa ja putkea ympäröivässä maassa tapahtuvat muodonmuutokset jäävät hyvin pieniksi. Taulukon 8.2 perusteella nähdään, että HSsmall -mallilla on suuri vaikutus pystysiirtymään. HSsmall-mallin arvot ovat renkaan alla keskimäärin 28 % pienemmät ja akselivälin alla 22 % pienemmät kuin mittaustulokset. Näin ollen todellinen laskennallinen arvo on laskettujen Hardening soil -mallin ja HSsmall –mallin tulosten välillä.

Vaikka laskennallisissa tuloksissa on suurta epävarmuutta, voidaan Hardening soil -mallin tuloksia pitää melko hyvinä. Laskennalliset arvot vastaavat kuitenkin suuruusluokaltaan mittaustuloksia. Mitatut ja laskennalliset pystysiirtymän arvot ovat suuruusluokaltaan millimetrin sadasosia. Pystysiirtymän arvot ovat siis putken ulkohalkaisijaan verrattuna erittäin pieniä. Näin pienet pystysiirtymän arvot eivät ole kriittisiä putken kestävyyskannalta. Mitoitusta ajateltuna laskennalliset arvot ovat käytetyillä parametreilla ja materiaalimallilla varmalla puolella olevia tuloksia.

9 Johtopäätökset

Muovikomposiittiputken kestävyys riippuu käytetyistä lisäaineista, lujitteiden pituudesta ja suuntauksesta, valmistustavasta sekä käytetystä polyesterityypistä ja polyesterityypin valmistuksesta käytetyistä lähtöaineista. Kirjallisuustutkimuksessa osoittautui, että muovikomposiiteissa tavallisimmin käytetty tyydyttymätön polyesteri kestää yleisesti hyvin vettä, vahvoja emäksiä, suolaliuoksia, rasvoja ja öljyjä, voiteluaineseoksia, alko-holeja sekä bensiiniä. Tyydyttymätön polyesteri osoittautui kuitenkin herkäksi auringon valon ultraviolettisäteilylle sekä happoliuksille ja happoja tuottaville mikro-organismeille. Tyydyttymättömästä polyesteristä valmistetuissa lopputuotteissa käytetään kuitenkin UV-stabilisaattoreita ehkäisemään polyesterin haurastumista, joten auringon valon ultraviolettisäteily ei rajoita muovikomposiittiputkien käyttöä.

Happoliuksia esiintyy pääasiassa sulfaattipitoisissa maapohjissa, joissa mikro-organismit tuottavat happoja aineenvaihdunnan tuotteina. Vaikka putkisiltoja ei asenneta koskaan suoraan maanpohjaan, tulee putkivalmistajalta kuitenkin varmistaa muovikomposiittiputken soveltuvuus ympäristöön, jossa happamat olosuhteet ovat mahdollisia. Muovikomposiittiputken sallittu ylin käyttölämpötila riippuu käytetystä polyesterityypistä. Ortoftaattipolyestereillä ylin sallittu lämpötila voi olla vain +25 astetta, mutta isoftaattipolyesterillä sallittu käyttölämpötila on +45 astetta. Suomessa ilman lämpötila harvoin nousee yli +35 asteen, joten isoftaattipolyesteristä valmistetut komposiittiputket soveltuvat siis aina käytettäväksi Suomen ilmastoon. Pakkasella muovikomposiittiputken lujuus- ja jäykkyysominaisuudet kasvavat, mutta murtumismekanismi on hauraampaa. Muovikomposiitin pakkasen kestävyys riippuu komposiittin imeytyneestä kosteudesta sekä muovikomposiitin rakenteesta ja lujuusominaisuuksista. Tämän tutkimuksen perusteella ei voida kuitenkaan sanoa soveltuuko muovikomposiittiputki käytettäväksi kylmissä olosuhteissa, joten muovikomposiittiputken soveltuvuus on syytä aina varmistaa putkivalmistajalta. Jatkotutkimuksissa tulisinkin tarkastella muovikomposiitin pakkasenkestävyyttä.

Tämän tutkimuksen pysyvien muodonmuutosten mittauksissa havaittiin mittakellon ja mittanauhan avulla lasersäteeseen perustuvien mittalaitteiden antavan virheellisiä arvoja putken sisähalkaisijoista. Syynä virheellisiin mittaustuloksiin saattaa olla laserkeilaimen mittaustarkkuus ja putken sisäpinta, joka oli hyvin kiiltävä. Kiiltävät pinnat palauttavat säteen suurella teholla takaisin, joka aiheuttaa tuloksiin mittausrvirhettä. Mittakellolla ja mittanauhalla mitatut tulokset olivat yhden millimetrin tarkkuudella samoja, mutta niiden perusteella on vaikea arvioida kuinka paljon putkeen on syntynyt muodonmuutoksia putken asennuksen jälkeen, sillä mittaukset suoritettiin seitsemän kuukauden jälkeen putken asennuksesta. Putken valmistusmenetelmästä johtuen putken sisähalkaisija voi poiketa useita millimetriä eri poikkileikkauksien välillä, joten ei ole mielekästä arvioida putkessa tapahtuneita muodonmuutoksia yhden mittauskerran perusteella. Pysyvien muodonmuutosmittausten perusteella on suositeltavaa käyttää seuraavissa muodonmuutosmittauksissa tankomikrometriä.

Tutkimuksen hetkellisten muodonmuutosmittausten perusteella havaittiin, ettei kuorma-auton nopeudella ja kuormitus suunnalla ole vaikutusta putkessa tapahtuviin siirtymiin ja muodonmuutoksiin yli kahden metrin peitesyvyydellä. Lisäksi havaittiin kuorma-autojen aiheuttavan putkeen hyvin pieniä siirtymiä ja muodonmuutoksia. Kuorma-autojen akselin välin keskellä mitattiin keskimäärin 0,074 mm pystysiirtymiä ja renkaan

alla keskimäärin 0,068 mm. Mittauksissa käytettiin siirtymäantureita, joiden mittaus-tarkkuus oli 0,07 mm. Vaikka mitatut arvot ovat lähellä siirtymäantureiden mittaustarkkuutta voidaan tuloksia pitää varsin luotettavana, sillä mitattujen pystysiirtymien hajonta oli neliakselisella kuorma-autolla 1-6,8 % ja kolmiakselisella kuorma-autolla 2-17,7 %.

Koekohteen putkesta mitatut muodonmuutokset ja niiden kautta lasketut jännitykset eivät ole putken kestävyyskannalta kriittisiä. Mittausten perusteella koekohteessa käytetty muovikomposiittiputki soveltuu käytettäväksi kuormia kantavana rakenteena mursketäytöissä, kun putken peitesyvyys on noin 2,3 m. Pienemmillä peitesyvyyksillä liikenteen aiheuttama väsyttävä kuormitus kasvaa ja kestävyys on varmistettava laskelmin tai kokeellisesti. Liikenteen aiheuttamaa väsytyä muovikomposiittiputkiin tulisi jatkossa tutkia, sillä kirjallisuustutkimuksessa osoittautui, että katkokuiduilla vahvistettujen polystereiden väsymiskestävyys on vaatimaton. Muovikomposiittiputkissa toisaalta käytetään kvartsihiekkaa jäykkyyden lisäämiseksi, jolloin kuorman aiheuttama väsyttävä vaikutus saattaa olla pienempi.

Laskennallisen ja mittaustulosten vertailun perusteella laskennalliset arvot poikkesivat mittaustuloksista 25-38 %. Tulosten välinen suuri poikkeama johtuu suurimmaksi osaksi laskentamallissa käytetyistä materiaaliparametreista ja materiaalmallista. Poikkeamaa aiheuttaa lisäksi se, että siirtymät olivat alle 0,1 mm. Tulosten perusteella Hardening soil –malli soveltuu käytettäväksi putkirakenteiden mitoittamiseen, sillä laskennallisesti saadut siirtymät olivat suurusluokaltaan samoja kuin mittaustulokset. Yli kahden metrin peitesyvyyksillä todennäköisesti tarkin laskentamalli on pienten muodonmuutosten huomioiva HSsmall –malli. Laskennallisessa mielessä jatkossa tulisi tarkastella HSsmall –mallin vaikutuksia putken ja maan väliseen yhteistoimintaan.

Tämän tutkimuksen perusteella rotaatiovalulla valmistetut putket, joiden lujuusominaisuudet, ulkohalkaisijat ja seinämä paksuudet ovat yhtä suuret kuin koekohteen putkella, soveltuvat käytettäväksi tierumpuna tai siltoina kun putken käyttölämpötila on yli nolla astetta ja putken asennussyvyys murskepenkereeseen on noin 2,3 m. Muissa tapauksissa putken kantokestävyys on tarkasteltava laskelmin tai kokeellisin menetelmin. Pakkasolosuhteissa putken soveltuvuus on varmistettava putkivalmistajalta.

Lähdeluettelo

Airasmaa, I. & Johansson, C.-J. & Kokko, J. & Komppa, J. & Linkoaho, P. & Piltz, A. & Saarela, O. 1984. Lujitemuovitekniikka. Helsinki. Muoviyhdistys. 344 s. ISBN 951-9271-13-9

Amiantit. 2014a. AMIPOX GRE pipe systems: Glass Reinforced Epoxy Pipe Solutions for various Applications brochure. 8 s. [Viitattu 8.8.2014]. Saatavissa: <http://www.amiantit.com/media/pdf/brochures/AMIPOX/files/AMIPOX.pdf>

Amiantit. 2014b. Flowtite pipe systems: gravity sewer brochure. 36 s. [Viitattu 8.8.2014]. Saatavissa: http://www.amiantit.com/media/pdf/brochures/Gravity_Sewer/files/Gravity_Sewer.pdf

Amiantit. 2014c. Amipox piping system: Installation Manual brochure. 44 s. [Viitattu 8.8.2014]. Saatavissa: http://amiantit.com/media/pdf/brochures/AMIPOX_piping_systems_installation_manual/files/FT_Manual_Amipox.pdf

Amiantit. 2014d. Flowtite Installation Guide of Buried Pipes brochure 72 s. [Viitattu 28.8.2014]. Saatavissa: http://www.amiantit.com/media/pdf/brochures/FLOWTITE_Install_Guide/files/FLOWTITE_Install_Guide.pdf

Birch, S. B. & Updyke, E. 2008. Public Works Inspectors' Manual. BNI Building News. 567 s. ISBN 978-1-55701-639-3 (sähköinen)

Bizier, P. 2007. Gravity sanitary sewer design and construction. Reston, USA. American Society of Civil Engineers. 414 s. ISBN 978-0-7844-7187-6 (sähköinen), ISBN 978-0-7844-0900-8 (painettu)

Brinkgreve, R.B.J. & Swolfs, W.M. & Engin, E. 2011a. Plaxis 2D 2011. General Information. 16 s. ISBN 978-90-76016-11-5

Brinkgreve, R.B.J. & Swolfs, W.M. & Engin, E. 2011b. Plaxis 2D 2011. Validation & Verification 118 s. ISBN 978-90-76016-11-5

Brinkgreve, R.B.J. & Swolfs, W.M. & Engin, E. 2011c. Plaxis 2D 2011. Reference manual 290 s. ISBN 978-90-76016-11-5

Brinkgreve, R.B.J. & Swolfs, W.M. & Engin, E. 2011d. Plaxis 2D 2011. Material Model manual 202 s. ISBN 978-90-76016-11-5

Brinkgreve, R.B.J. & Swolfs, W.M. & Engin, E. 2012. Plaxis 3D 2012. Reference manual 284 s. ISBN 978-90-76016-12-2

CEN ISO/TS 17892-1. 2004. Geotekninen tutkimus ja koestus. Osa 1: Vesipitoisuuden määrittäminen. Helsinki, Suomi: Suomen Standardisointiliitto. 9 s.

CEN ISO/TS 17892-3. 2004. Geotekninen tutkimus ja koestus. Maan laboratoriokeet. Osa 3: Kiintotiheyden määrittäminen. Pyknometrimenetelmä. Helsinki, Suomi: Suomen Standardisoimisliitto. 10 s.

CEN ISO/TS 17892-4. 2004. Geotekninen tutkimus ja koestus. Maan laboratoriokeet. Osa 4: Rakeisuuden määrittäminen. Helsinki, Suomi: Suomen Standardisoimisliitto. 26 s.

CEN ISO/TS 17892-10. 2004. Geotekninen tutkimus ja koestus. Maan laboratoriokeet. Osa 10: Suorat leikkauskokeet. Helsinki, Suomi: Suomen Standardisoimisliitto. 14 s.

Center for Underground Infrastructure Research and Education CUIRE. 2004. Horizontal auger boring projects. Reston, USA. American Society of Civil Engineers. 49 s. ISBN 978-0-7844-7110-4 (sähköinen)

Handy, R. L. & Spangler, M. G. 2007. Geotechnical Engineering. Soil and Foundations Principles and Practice. New York, USA. SBN-13: 978-07-148120-5. ISBN-10: 0-07-148120-6.

HBM. 2014a. QuantumX MX840A- 8-channel universal amplifier. [Viitattu 15.6.2014]. Saatavissa: <http://www.hbm.com/en/menu/products/measurement-electronics-software/compact-universal-data-acquisition-system/quantumx-mx840a/>

HBM. 2014b. CANHED – The distributed amplifier system for structural testing and experimental stress analysis. [Viitattu 15.6.2014]. Saatavissa: <http://www.hbm.com/en/menu/products/measurement-electronics-software/specialized-data-acquisition-systems/experimental-stress-analysis/canhead/>

HBM. 2014c. MGCplus – The renowned scalable and configurable data acquisition system for laboratory and test stand. [Viitattu 15.6.2014]. Saatavissa: <http://www.hbm.com/en/menu/products/measurement-electronics-software/laboratory-test-stand/>

HBM. 2014d. Catman software: The ideal measurement tool. [Viitattu 15.6.2014]. Saatavissa: <http://www.hbm.com/en/menu/products/software/data-acquisition-software/catman/>

HBM. 2014e. U2B highly versatile load cell for tensile and compressive forces. [Viitattu 15.6.2014]. Saatavissa: <http://www.hbm.com/en/menu/products/transducers-sensors/force/u2b/>

Hobas. 2014a. Hobas pipe systems – Improving the Quality of Life around the Globe brochure. 20 s. [Viitattu 8.8.2014]. Saatavissa: http://www.hobas.com/fileadmin/Daten/PUBLIC/Brochures_World_pdf/1203_HOBAS_Pipe_Systems_Image_Profile_web.pdf

Hobas. 2014b. Technical Product Data – Gravity Pipe Systems PN 1 brochure. 44 s. [Viitattu 10.8.2014]. Saatavissa: http://www.hobas.com/fileadmin/Daten/PUBLIC/Brochures_World_pdf/1404_HOBAS_Gravity_Pipe_Systems_web.pdf

Hobas. 2014c. Jacking Pipes brochure. 16 s. [Viitattu 10.8.2014]. Saatavissa: http://www.hobas.com/fileadmin/Daten/PUBLIC/Brochures_World_pdf/1404_HOBAS_Jacking_Pipes_web.pdf

Hobas. 2014d. Hobas Relining Pipes brochure. 12 s. [Viitattu 19.8.2014]. Saatavissa: http://www.hobas.com/fileadmin/Daten/PUBLIC/Brochures_World_pdf/1404_HOBAS_Relining_Pipes_web.pdf

Hunt, R.E. 1986. Geotechnical engineering analysis and evaluation. New York. McGraw-hill. 729 s. ISBN 0-07-031310-5

Johnson, A. 1979. Engineering design properties of GRP: a joint BPF and NPL project. Lontoo, Englanti: British Plastics Federation. 181 s.

Järvinen, J. 2007. Laserkeilaimilla tuotettujen keilausaineistojen yhdistäminen. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, Maanmittausosasto. Espoo. 55 s.

Jääskeläinen, H. 1973a. Taipuisiin putkijohtoihin kohdistuva maanpaine. Otaniemi. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, geotekniikan laboratorio, tiedonanto 5. 63 s.

Jääskeläinen, H. 1973b. Modulus of passive resistance for the protective material of flexible pipes. Helsinki. Technical research centre of Finland, publication 6. 60 s. ISBN 951-38-0022-9

Kainulainen, J. 2003. Muoviputkijärjestelmät. Helsinki. Cheamas. 110 s. ISBN 952-9597-55-X

Karo, J.H. 1970. Lujitemuovit: tyydyttämättömät polyesterihartsit ja niiden käyttö lujitemuoveissa ja muovibetoneissa. Porvoo; Helsinki. s. 181

Kekki, T.K. & Kaunisto, T. & Keinänen-Toivola M.M. & Luntamo, M. 2008. Vesijohdot materiaalien vauriot ja käyttöikä Suomessa. Turku. Vesi-Insituutti/Prizztech Oy. 186 s. ISBN 978-952-99840-4-6

Kolisoja, P. 2014. Professori. Tampereen teknillinen yliopisto. Tampere, PL 600, 33101 TTY. Haastattelu 23.2.2014.

Korhonen, K.-H. 1963. Pienten putkijohtojen kuormituksesta. Helsinki. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, julkaisu 78. 79 s.

Korkiala-Tanttu, L. 2008. Calculation method for permanent deformation of unbound pavement materials. Väitöskirja. Teknillinen korkeakoulu, Yhdyskunta- ja ympäristötekniikan osasto. Espoo. 92+84 s. ISBN 978-951-38-7135-2

Kyowa, 2014. Kyowa KFG strain gages. [Viitattu 15.6.2014]. Saatavissa: https://www.kyowa-ei.co.jp/eng/product/strain_gages/gages/kfg01.html

Laine, A. & Järvelä, P. 1989. Lujitemuovien vaurioituminen. Espoo. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, tiedote 1065. 50 s. ISBN 951-38-3596-0

Laitila, J. & Tuominen, H. & Saarela, O. & Komppa, V. 1991. Huokoisuus lujitemuovi-tuotteissa. Otaniemi. Teknillinen korkeakoulu, kevytrakennetekniikan laboratorio, ra-portti 24. 37 s. ISBN 951-22-0739-7

Liikennevirasto. 2014. Teräsputkisillat: suunnitteluohje. 98 s. [verkkajulkaisu] [Viitattu 30.8.2014]. Saatavissa: http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf8/lo_2014-10_terasputkisillat_suunnitteluohje_web.pdf

Litokorpi, A. 2013. Optimized Efficiency; Micro-Tunneling and Modular Tank Appli-cation Cases with CC-GRP. Konferenssi INFRA 14 infrajohtamisen tulevaisuuspäivä. Helsinki, Suomi. 4.3.2014. 48 s. [Viitattu 17.9.2014]. Saatavissa: <http://www.infrajohtaminen.fi/File/375/hobas-sales-partner-in-finland.pdf>

Lännen Alituspalvelu. 2014. Vasaraporaus. [Viitattu 4.9.2014]. Saatavissa: <http://www.lannenalitus.com/vasaraporaus>

Mark, H.F. & Bikales, N. & Overberger, C.G. & Menges, G. & Kroschwitz, J. I. 1988. Encyclopedia of polymer science and engineering. Vol. 12, Polyesters to polypeptide synthesis. New York, USA. 858 s. ISBN 0-471-80944-6

Meriläinen, J. 2014. Diplomi-insinööri. Liikennevirasto. Lappeenranta, Laserkatu 6, 53850 Haastattelu 1.9.2014.

MTS. 2014. MTS tunneling systems brochure. 11 s. [Viitattu 16.9.2014]. Saatavissa: http://www.mts-p.de/tl_files/Inhalte/pdf/mts_broschur_eng_de_130321.pdf

Mäkeläinen, P. 1980. Muovirakenteet. Espoo. Otakustantamo. 263 s. ISBN 951-671-250-9

Pankakoski, K. & Auerikari, P. & Kauppinen, P. & Sarkimo, M. & Uuttu, T. 1992. Muovikomposiittirakenteen suunnittelu ja elinikä : yhteenveto. Espoo. Valtion teknilli-nen tutkimuskeskus, tiedote 1415. 35+4 s. ISBN 951-38-4309-2

Pihlajamäki, J. 2012. Suulakepuristetun polystyreenilevyn soveltuvuus pehmeikölle perustetun kadun päällysrakenteeseen. Diplomityö. Aalto-yliopiston Insinööritieteiden korkeakoulu, Rakennustekniikan laitos. Espoo. 57+1 s.

Pritchard, G. 2000. Reinforced plastics durability. Boca Raton, USA. CRC Press LLC. 372 s. ISBN 0-8493-0547-0

PRS. 2014. Vasaraporaus. [Viitattu 4.9.2014]. Saatavissa: <http://www.prs.ee/fi/palvelut/putkistojen-rakentaminen-ja-saneeraaminen-kaivamattomilla-menetelmilla/vasarpuurimine/>

Potts, D.M & Zdravkovic, L. 1999. Finite element analysis in geotechnical engineering. Lontoo. Thomas Telford Ltd. 440 s. ISBN 0-7277-2753-2

- Rahman, S. 2010. Rigid and Flexible pipes. Trenchless Technology. Vol 19:11. s. 36-42. ISSN 1064-4156. Saatavissa: <http://trenchlessonline.com/inc/data/archives/2010-11-01.pdf>
- Riikonen, M. 2014. Telimassojen korottamisen vaikutus tierakanteen vasteisiin – laskennallinen tarkastelu. Diplomityö. Aalto-yliopiston Insinööritieteiden korkeakoulu. Espoo. 132+36 s.
- Rathmayer, H. & Tammirinne, M. & Wäre, O. 1977. Hienorakeisten maalajien soveltuvuus taipuisten putkijohtojen suojamateriaaliksi. Espoo. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, geotekniikan laboratorio, tiedonanto 30. 80+2 s. ISBN 951-38-0521-2
- Reddy, J.N. 2004. An introduction to nonlinear finite element analysis. New York, USA: Oxford University Press 482 s. ISBN 978-0-19-852529-5
- Saarela, O. & Airasmaa, I. & Kokko, J. & Skrifvars, M. & Komppa, V. 2003. Komposiittirekenteet. Helsinki. Muoviyhdistys. 494 s. ISBN 951-9271-27-9
- Seppälä, J. 2005. Polymeeritekniikan perusteet. Helsinki. Otatieto. 346 s. ISBN 951-672-348-9
- SFS-EN ISO 14688-2. 2005. Geotekninen tutkimus ja koestus. Maan tunnistaminen ja luokitus. Osa 2: Luokituksen perusteet. Helsinki, Suomi: Suomen Standardisoimisliitto. 17 s.
- SFS-EN 1610. 1998. Construction and testing of drains and sewers. Helsinki, Suomi: Suomen Standardisoimisliitto. 38 s.
- Siikanen, U. 2009. Rakennusaineoppi. Helsinki. Rakennustieto Oy. 328 s. ISBN 978-951-682-942-8
- Solartron, 2014. Analogue gauging probe- AX. [Viitattu 15.6.2014]. Saatavissa: <http://www.solartronmetrology.com/products/analogue-gauging/analogue-gauging-probe-ax.aspx>
- Suomen geoteknillinen yhdistys ry. 1985. GLO-85. Geotekniset laboratorio-ohjeet. 1, Luokituskokeet. Helsinki. Rakentajain Kustannus Oy. 107s. ISBN 951-676-308-1
- Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL. 1985. RIL 127-1985. Muovit rakentamisessa. Helsinki, Suomi: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto r.y. 305 s. ISBN 951-758-046-0
- Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL. 1990. RIL 157-2-1990 Geomekaniikka 2. Helsinki, Suomi: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto r.y. 433 s. ISBN 951-758-213-7
- Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL. 1996. RIL 183-2.62-1996 Rakennusmateriaalien ja rakenteiden käyttöikä. 2.62, Orgaaniset rakennusaineet : muovit. Helsinki, Suomi: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto r.y. 103 s. ISBN 951-758-362-1

Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL. 2000. RIL 132-2000 Talonrakennuksen maa- rakenteet : yleinen rakennusselostus ja laatuvaatimukset. Helsinki, Suomi: Suomen Ra- kennusinsinöörien Liitto r.y. 123 s. ISBN 951-758-410-5

Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL. 2013. RIL 77-2013 Maahan ja veteen asennet- tavat kestumuoviputket : asennusohjeet. Helsinki, Suomi: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto r.y. 71 s. 978-951-758-564-4

Suominen, A. 2007. Nykyaikaisia 3D-mittausmenetelmiä talonrakentamisen laadunpa- rantamisen apuna. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, Rakennus- ja ympäristötekni- kan osasto. Espoo. 85 s.

Tiehallinto. 2005. Tietoa tiensuunnitteluun nro 71D. Tien päällysrakenteen mitoitukses- sa käytettävät moduulit ja kestävyysmallit. [verkkojulkaisu] [Viitattu 26.6.2014]. Saata- vissa: <http://alk.tiehallinto.fi/thohje/tts71d.pdf>

Tiehallinto. 2008. Teräsputkisillat, Rakentamisen laatuvaatimukset. [verkkojulkaisu] [Viitattu 23.5.2014]. Saatavissa: http://alk.tiehallinto.fi/sillat/julkaisut/terasputkisillat_rakentamisohje_2008.pdf

Tiehallinto. 2009a. Tiehallinnon sillaston rakenne, palvelutaso ja kunto. [verkkojulkai- su] [Viitattu 30.8.2014]. Saatavissa: <http://alk.tiehallinto.fi/sillat/julkaisut/sillat090101.pdf>

Tiehallinto. 2009b. Siltojen ylläpito: Toimintalinjat. [verkkojulkaisu] [Viitattu 30.8.2014]. Saatavissa: <http://alk.tiehallinto.fi/sillat/julkaisut/siltojenyllapito2009.pdf>

Tielaitos. 1993. Sitomattomien kerrosten kiviainesten muodonmuutosominaisuudet. [verkkojulkaisu] [Viitattu 26.6.2014]. Saatavissa: http://alk.tiehallinto.fi/julkaisut/pdf1/3200164-sitom_kerrosten_kiviain_muodonmuut.pdf

Whidden, R.W. 2009. Buried Flexible Steel Pipe - Design and Structural Analysis. Reston, USA: American Society of Civil Engineers. 124 s. ISBN 9781621980612 (sähköinen)

Zoller+Fröhlich. 2014. z+f imager 5010 brochure. 16 s. [Viitattu 9.6.2014]. Saatavissa: http://www.z-laser.com/fileadmin/editor/Broschueren/Z_F_IMAGER_5010_E_FINAL_kompr.pdf

Liiteluettelo

Liite 1. Kaivannon ohjeelliset luiskakaltevuudet. 1 sivua

Liite 2. Kyowan rosettiliuskojen tuotetiedot. 1 sivua.

Liite 3. Pohjamaan syvyystasojen seulonnan ja areometrikokeen yhdistetyt rakaisuuskäyrät. 1 sivua.

Liite 4. Putken ympärystäytön rakeisuuskäyrät. 1 sivua.

Liite 5. Putken ympärystäytön maalajiluokitus. 1 sivua.

Liite 6. HVS-kokeessa mitatut kosketuspinta-alat paripyörälle (Korkiala-Tanttu 2008, Appendix A). 2 sivua.

Liite 7. HVS-kokeessa suoritettun kolmiaksiaalikokeen deviatorinen jännityskokoonpuristumakuvaaja. 2 sivua

Liite 1. Kaivannon ohjeelliset luiskakaltevuudet. (RIL 2000, s. 31)

Luokka	Maapohja	Kaivannon syvyys		
		h<1,2 m	1,2m<h<2,0m	h>2,0 m
		Luiskan kaltevuus		
I	Löyhä ja keskitiivis siltti Löyhä ja keskitiivis hiekka Löyhä sora Löyhä moreeni	Pystysuora	1:2,5...1:1 riippuen maa- aineksen laadusta ja ominaisuuksista	
II	Tiivis siltti ¹⁾ Tiivis hiekka Keskitiivis sora Keskitiivis moreeni ¹⁾	Pystysuora	< 2:1...3:1	< 1:1...2:1
III	Tiivis sora Tiivis moreeni	Pystysuora	< 4:1...5:1	< 3:1...4:1

¹⁾ Mikäli kaivu tapahtuu pohjavedenpinnan tuntumassa tai sen alapuolella, on käytettävä luokan I mukaisia kaltevuuksia

Liite 2. Kyowan rosettiliuskojen tuotetiedot.

TYPE KFG-10-120-D17-11L1M3S	
GAGE FACTOR (24°C, 50%RH)	2.10 ± 1.0%
GAGE LENGTH	10 mm
GAGE RESISTANCE (24°C, 50%RH)	120.0 ± 0.8 Ω
ADOPTABLE THERMAL EXPANSION	11.7 PPM/°C
LOT No. Y3352S	BATCH 021A N06
TEMPERATURE COEFFICIENT OF GAGE FACTOR +0.008 %/°C	
APPLICABLE GAGE CEMENT CC-33A, EP-34B	
QUANTITY 10	

KYOWA STRAIN GAGES

共和ひずみゲージのお取扱いは裏面をご覧ください。
See the back of package for installation of Kyowa strain gages.



KYOWA STRAIN GAGES

 **株式会社 共和電業**

〒182-8520 東京都調布市調布ヶ丘3-5-1
TEL : 042-488-1111(大代) FAX : 042-481-3258
URL : <http://www.kyowa-ei.co.jp>

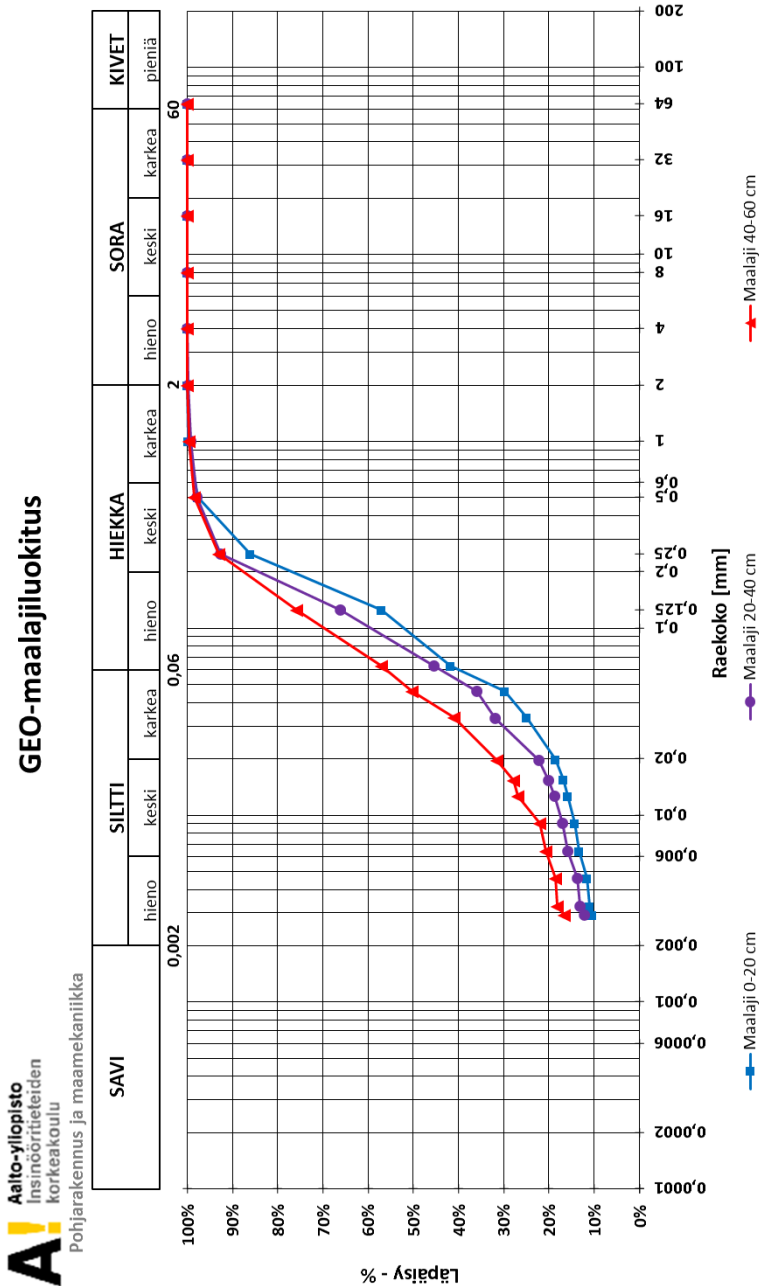
 **KYOWA**

KYOWA ELECTRONIC INSTRUMENTS CO., LTD.
3-5-1, Chofugaoka, Chofu, Tokyo, 182-8520, Japan
Phone : +81-42-488-1111 Fax : +81-42-481-3258
URL : <http://www.kyowa-ei.com>

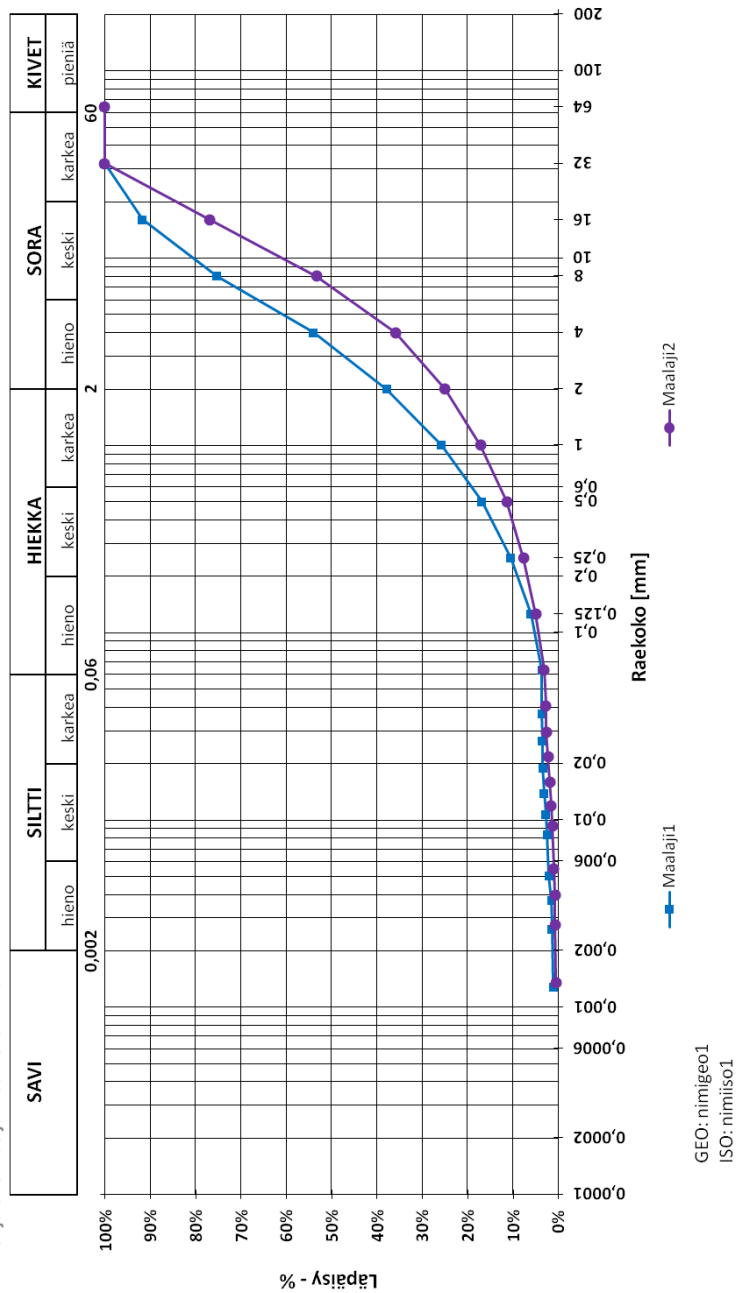

 表紙, 台紙


 外袋 : PP
 ゲージ保護シート : PET
 接着用フィルム : PE

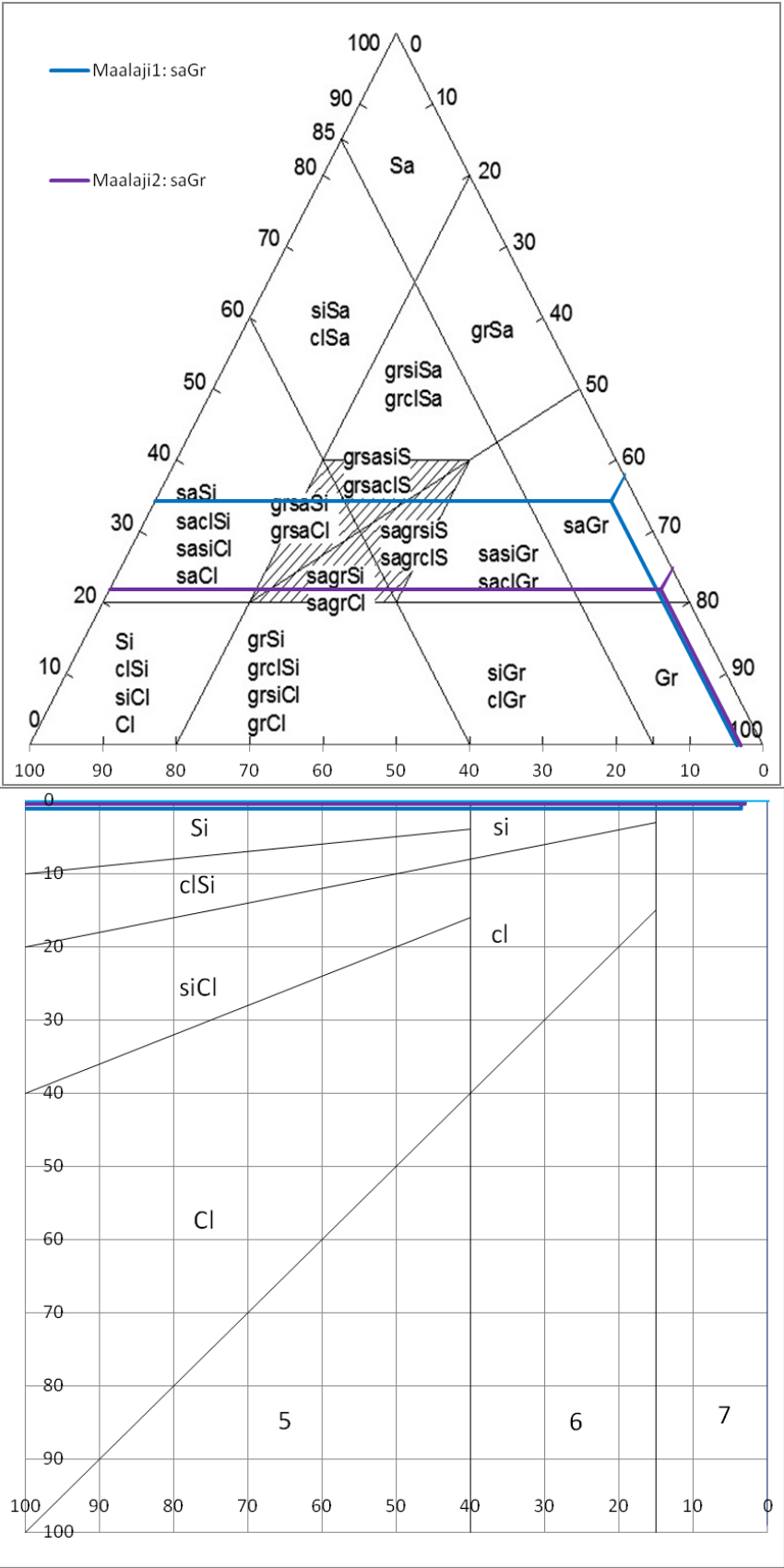
Liite 3. Pohjamaan syvyystasojen seulonnan ja areometrikokeen yhdistetyt rakeisuuskäyrät.



Liite 4. Putken ympäristäytön rakeisuuskäyrät.



Liite 5. Putken ympärystäytön maalajiluokitus.



Liite 6. HVS-kokeessa mitatut kosketuspinta-alat pari-pyörälle ja super single yksikköpyörälle (Korkiala-Tanttu 2008, Appendix A, Appendix B)

HVS-Nordic dual wheel

The contact area with varying wheel load and tyre pressure

The contact area has been measured with planimeter from the paper.

Spring-overload test		Tyre 1				Tyre 2			Distance between tyres	Measured total area	Contact pressure	Average width	Average length
Tyre pressure	Wheel load	Width	Length	Measured area	Width	Length	Measured area						
kPa	kN	cm	cm	cm ²	cm	cm	cm ²	cm	m ²	kPa	cm	cm	
500	30,20	22,10	19,20	386,50	22,20	19,90	381,00	10,50	0,07675	393,50	22,15	19,55	
500	40,10	22,50	22,50	458,50	22,30	22,50	443,00	10,30	0,09015	444,80	22,40	22,50	
500	50,59	22,70	25,30	530,00	22,60	25,40	536,70	10,20	0,10667	474,30	22,65	25,35	
500	60,88	22,60	27,70	581,10	22,60	27,60	595,90	10,20	0,1177	517,20	22,60	27,65	
500	70,97	22,60	29,80	637,70	22,60	29,90	644,80	10,30	0,12825	553,40	22,60	29,85	
500	81,90	22,70	34,80	730,90	22,70	34,40	714,80	10,10	0,14457	566,50	22,70	34,60	
600	30,33	22,10	18,90	347,30	22,30	20,10	389,50	10,40	0,07368	411,60	22,20	19,50	
600	40,47	22,20	20,50	392,50	22,40	21,00	423,50	10,25	0,0816	496,00	22,30	20,75	
600	50,92	22,60	22,30	460,00	22,70	23,30	509,40	10,10	0,09694	525,30	22,65	22,80	
600	60,15	22,60	25,20	523,50	22,70	26,20	553,70	10,20	0,10772	558,40	22,65	25,70	
600	71,05	22,70	27,60	574,70	22,80	28,30	602,10	10,10	0,11768	603,80	22,75	27,95	
600	82,00	22,80	30,90	644,00	22,70	32,40	678,30	10,10	0,13223	620,10	22,75	31,65	
700	30,25	21,40	17,10	309,50	21,60	17,00	317,60	11,00	0,06271	482,40	21,50	17,05	
700	40,59	22,00	19,30	377,50	22,00	19,40	386,00	10,60	0,07635	531,60	22,00	19,35	
700	50,41	22,30	21,20	429,50	22,40	21,80	443,60	10,40	0,08731	577,40	22,35	21,50	
700	61,19	22,70	23,90	503,80	22,70	23,60	509,30	10,30	0,10131	604,00	22,70	23,75	
700	70,94	22,70	26,30	556,50	22,70	26,00	568,90	10,20	0,11254	630,40	22,70	26,15	
700	81,20	23,00	29,00	630,10	22,90	29,40	637,30	10,10	0,12674	640,70	22,95	29,20	
800	30,26	21,20	16,20	290,40	21,00	17,20	303,60	11,50	0,0594	509,40	21,10	16,70	
800	40,15	22,20	18,80	363,40	22,30	18,70	374,20	10,30	0,07376	544,30	22,25	18,75	
800	50,93	22,50	21,10	419,40	22,60	21,00	430,20	10,20	0,08496	599,50	22,55	21,05	
800	60,15	22,70	22,70	477,20	22,90	22,50	484,20	10,10	0,09614	625,70	22,80	22,60	
800	70,56	22,80	24,30	520,00	22,60	24,60	529,80	10,10	0,10498	672,10	22,70	24,45	
800	80,00	22,90	27,70	601,40	22,90	28,30	605,80	10,00	0,12072	662,70	22,90	28,00	
*calculated average value for 850 kPa													
850	70,82	22,85	24,05	517	22,75	24,4	528,3	10,1	0,10452	677,60	22,80	24,23	
900	30,26	21,1	16,6	296,4	21,6	17,3	308,7	11,1	0,06051	500,10	21,35	16,95	
900	40,3	22,3	19	367	22	19,1	367,6	10,5	0,07346	548,60	22,15	19,05	
900	50,73	22,7	20,4	421,1	22,6	21,5	440,3	10,1	0,08614	588,90	22,65	20,95	
900	60,86	22,8	22,3	468,4	22,7	23,9	488,9	10,1	0,09573	635,70	22,75	23,10	
900	71,08	22,9	23,8	513,9	22,9	24,2	526,7	10,1	0,10406	683,10	22,90	24,00	
900	80	23	26,5	572,8	23,1	27,1	593,2	10	0,1166	686,10	23,05	26,80	

HVS-Nordic Super Single wheel**The contact area with varying wheel load and tyre pressure**

The contact area has been measured with planimeter from the paper.

Low-volume road test						
Tyre pressure	Wheel load	Width	Length	Measured area	Contact pressure	Measured area
kPa	kN	cm	cm	cm ²	kPa	m ²
500	31,01	24,40	30,90	652,40	475,32	0,06524
500	40,34	29,60	31,00	814,40	495,33	0,08144
500	50,79	34,50	31,20	941,40	539,52	0,097414
500	61,16	37,20	31,40	1064,30	574,65	0,10643
500	70,90	38,00	31,40	1141,10	621,33	0,11411
600	31,00	23,00	30,60	594,90	521,10	0,05949
600	40,44	27,50	31,00	730,60	553,52	0,07306
600	51,01	32,30	31,20	855,70	596,12	0,08557
600	61,19	34,00	31,40	954,30	641,20	0,09543
600	71,31	36,90	31,60	1073,40	664,36	0,10734
600	80,00	38,80	31,70	1171,60	682,83	0,11716
700	31,01	21,70	30,00	543,40	570,67	0,05434
700	39,90	25,40	30,90	667,40	597,84	0,06674
700	51,17	28,50	31,10	778,20	657,54	0,07782
700	60,94	31,80	31,30	883,30	689,91	0,08833
700	71,15	33,70	31,40	977,50	727,88	0,09775
700	81,80	36,30	31,60	1081,10	756,64	0,10811
800	31,01	20,70	29,30	520,30	596,00	0,05203
800	40,08	23,80	29,60	625,90	640,36	0,06259
800	49,99	25,40	31,00	707,60	706,47	0,07076
800	60,85	28,70	31,40	825,10	737,49	0,08251
800	70,91	30,00	31,40	889,10	797,55	0,08891
800	82,10	34,00	31,60	1019,50	805,30	0,10195
900	30,98	20,30	30,30	511,20	606,03	0,05112
900	39,88	22,10	30,60	581,20	686,17	0,05812
900	50,79	25,10	31,00	715,30	710,05	0,07153
900	60,90	28,00	31,20	809,20	752,60	0,08092
900	71,12	29,00	31,20	869,20	818,22	0,08692
900	82,00	32,00	31,60	990,60	827,78	0,09906

Liite 7. HVS-kokeessa suoritettun kolmiakksiaalikokeen deviatorinen jännitys-kokoonpuristumakuvaaja

